

# Trabalho de Conclusão de Curso

Fábio José Vigano

## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR**

Florianópolis

2018



Universidade Federal de Santa Catarina  
Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental

Fábio José Vigano

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO  
PARA MEDIÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO**

Trabalho Conclusão do Curso de  
Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental do Centro Tecnológico da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a obtenção do Título  
de Bacharel em Engenharia Sanitária e  
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Hoinaski  
Corientador: Dr. Andy Blanco

Florianópolis  
2018

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do  
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.**

Vigano, Fábio José

Desenvolvimento de um sistema de baixo custo  
para medição de monóxido de carbono para  
monitoramento da qualidade do ar / Fábio José  
Vigano ; orientador, Leonardo Hoinaski,  
coorientador, Andy Blanco, 2018.

83 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2.  
Qualidade do ar. 3. Medição de gases poluentes. 4.  
Monóxido de carbono. 5. Sensores de baixo custo. I.  
Hoinaski, Leonardo. II. Blanco, Andy. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.



# **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO**

Trabalho submetido à banca examinadora como parte dos requisitos  
para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental

Florianópolis, junho 2018.



---

Prof. Dr. Leonardo Hoinaski  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Andy Blanco  
Coorientador

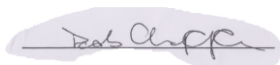
Universidade Federal de Santa Catarina

## **Banca Examinadora:**



---

Prof. Dr. Davide Franco  
(Membro da Banca)



---

Prof. Dr. Pedro Luiz Chaffe  
(Membro da Banca)

Este trabalho é dedicado a todos que aplicam forças na construção de um futuro melhor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus por instalar dentro de nós a centelha da vida.

À minha mãe, que sempre forneceu todo o amor, carinho e suporte necessários ao longo da minha vida. Sempre foi e será a pessoa mais importante da minha vida.

À minha irmã que tanto incentivou e apoiou durante os longos anos de estudo. A pessoa mais inteligente que já conheci.

Ao meu irmão e verdadeiro amigo, meus mais sinceros agradecimentos pela ajuda incessante, pelo interesse e paciência.

À minha cunhada pelas horas dedicadas à leitura e considerações acerca deste trabalho.

Às minhas sobrinhas que tanta alegria trazem à família.

Aos meus muitos parentes que sempre estiveram ao meu lado torcendo pelo meu sucesso.

Aos meus amigos, em especial aos colegas do LCQAr e aos colegas Rafael Carrasco, João Cipriano, Alan Guimarães e Rafael Nicolazzi, que estiveram comigo desde o começo. Amigos para a vida.

Aos meus professores na UFSC. Em especial, à Leonardo Hoinaski, que com suas rotineiras empolgação e determinação vem alavancando o LCQAr a níveis estratosféricos. Muito obrigado pela paciência e confiança. Conte sempre comigo para o que precisar.

Ao meu corientador Andy Blanco, pelo apoio técnico, ensinamentos e compreensão.

Aos membros da banca, Professores Davide Franco e Pedro Luiz Chaffe por aceitarem o convite, pelos ensinamentos transmitidos ao longo do curso e pelo apoio na revisão deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, a todos aqueles que vivem em nossos corações e por quem oramos com carinho e saudades.





*A compaixão para com os animais é das mais  
nobres virtudes da natureza humana.  
(Charles Darwin, 1860)*



## RESUMO

A qualidade do ar é uma preocupação crescente no mundo. O aumento progressivo da frota veicular contribui significativamente na emissão de poluentes à atmosfera. Como principal gás poluente destaca-se o monóxido de carbono, estando associado a diversos malefícios à saúde da população e meio ambiente. A medição deste poluente é convencionalmente executada utilizando-se redes de monitoramento formadas por estações fixas com instrumentos analisadores de alta complexidade. Os altos custos associados à construção e operação destas estações resultam em poucas unidades espalhadas pelo território catarinense. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um equipamento de baixo custo para medição de CO para monitoramento da qualidade do ar. A resposta do dispositivo desenvolvido é comparada àquela medida por um sistema de referência que utiliza outra tecnologia com melhores características como maior resolução. Um modelo de regressão linear é proposto com o objetivo de relacionar a concentração de monóxido de carbono medida pelo sistema de referência com a resposta do sensor de baixo custo presente no protótipo. A qualidade do ajuste do modelo é medida a partir dos coeficientes de determinação; pela raiz da média dos erros quadráticos e pela média dos erros. Coeficientes de correlação linear de Pearson são utilizados para averiguar a hipótese de que a resposta do sensor do protótipo é influenciada pelas condições atmosféricas. Conclui-se que as estimativas geradas pelo sistema de medição de baixo custo podem ser utilizadas para medições de concentrações de CO, desde que a qualidade dos dados não seja um requisito maior. As técnicas e métodos utilizados durante a elaboração do equipamento permitem o projeto e implementação de sistemas mais sofisticados, contribuindo assim para o desenvolvimento da ciência e engenharia na área de monitoramento da qualidade do ar.

**Palavras-chave:** Qualidade do ar. Medição de gases poluentes. Monóxido de carbono. Sensores de baixo custo.

## **ABSTRACT**

Worldwide concern regarding air quality has increased substantially in the past decade. The progressive increase in motor vehicle fleet represents a major contribution on total emissions of atmospheric pollutants. As a main pollutant, carbon monoxide plays an important role on decreasing air quality, posing environmental and public health risks. In general, measurements of carbon monoxide demands high complexity methods and equipments, which are associated to high implementation and operational costs. The present study aims on developing a low-cost carbon monoxide measurement equipment for air quality monitoring. Results obtained from the developed equipment are compared with a reference system of higher quality. In sequence, linear regression models are proposed in order to find the best curve that fit to the measurements between developed equipment and reference system. In conclusion, the low-cost carbon monoxide measurement equipment developed can be used to estimate pollutant concentration in cases which high data quality is not a primary concern. Methods and techniques utilized on this study can be further used to develop higher sophisticated equipments and contribute on the development of air quality monitoring systems.

**Keywords:** Air Quality. Pollutant Gas Measuring. Carbon Monoxide. Low-cost Sensing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de operação dos sensores semicondutores de óxidos metálicos.....	35
Figura 2 - Princípio de operação dos sensores eletroquímicos ...	36
Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de estimação de CO .....	40
Figura 4 - Sistema de medição de monóxido de carbono .....	44
Figura 5 - Componentes eletrônicos do protótipo do SMCO .....	45
Figura 6 - Projeto do sistema de arraste .....	46
Figura 7 - Montagem do sistema de arraste do fluido .....	47
Figura 8 - Ilustração do sistema eletrônico do protótipo do SMCO com suas respectivas conexões elétricas .....	48
Figura 9 - Hardware do protótipo do SMCO desenvolvido.....	48
Figura 10 - Fluxograma de operação do protótipo do SMCO ....	50
Figura 11 - Sistema de referência utilizado para calibração do SMCO. ....	52
Figura 12 - Fluxograma dos procedimentos gerais realizados durante cada experimentação .....	54
Figura 13 - Obtenção do arquivo de dados utilizado para obtenção do modelo de regressão linear .....	55
Figura 14 – Dados experimentais e verificação da normalidade das variáveis. Gráfico log-log dos dados experimentais e curvas de densidade e probabilidade utilizadas para verificação visual da normalidade das variáveis de entrada e saída: Figuras A, B e C. $Y_n$ é o logaritmo da concentração de monóxido de carbono normalizado. $X_n$ equivale ao logaritmo de 1023/ADC-1 normalizado, onde ADC é a resposta do sensor MOS. ....	57
Figura 15 - Modelo de regressão linear e erros residuais dos dados experimentais e de validação: Figuras A e B .....	61
Figura 16 - Gráficos de densidade e probabilidade do erro residual do modelo de regressão linear: Figuras A e B.....	62
Figura 17 - Curva exponencial das estimativas do modelo de regressão linear.....	66



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Testes de normalidade da entrada e saída do modelo de regressão linear.....	60
Tabela 2 - Testes da normalidade do erro residual do modelo de regressão linear.....	63
Tabela 3 - Modelo de regressão linear: coeficientes da curva, qualidade do ajuste e parâmetros da distribuição de probabilidade do erro residual. ....	64
Tabela 4 - Correlação linear entre os dados experimentais <sup>a</sup> . ....	65





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC – Conversor Analógico Digital  
AGV – Amostrador de Grande Volume  
CAD – Projeto Assistido por Computador  
CAE – Engenharia Assistida por Computador  
CAM – Produção Assistida por Computador  
CO – Monóxido de Carbono  
CSV – Arquivo Comum com Dados Separados por Vírgula  
EC – Sensores Eletroquímicos  
EEA – Agência de Meio Ambiente Europeia  
HC – Hidrocarbonetos  
HPA – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos Naturais Renováveis  
IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado  
IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos  
IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada  
I2C – Comunicação entre Periféricos via Circuito Integrado  
ME – Média Aritmética dos Erros  
MMA –Ministério do Meio Ambiente  
MOS – Semicondutores de Óxidos Metálicos  
NDIR – Infravermelho Não-Dispersivo  
NH<sub>3</sub> – Amônia  
NO<sub>x</sub> – Óxidos de Nitrogênio  
N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso  
O<sub>3</sub> – Ozônio  
PLA – Ácido Polilático  
PM – Material Particulado  
RMSE – Raiz da Média Aritmética dos Erros Quadráticos  
SMCO – Sistema de Medição de Monóxido de Carbono de Baixo Custo  
SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxofre  
SPI – Interface de Comunicação Serial entre Periféricos  
SRCO – Sistema de Referência de Medição de Monóxido de Carbono  
SSE – Somatório dos Erros Quadráticos  
USB – Barramento Universal Serial  
VOC – Compostos Orgânicos Voláteis  
WHO – World Health Organization



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	28
1.1.1	Objetivos específicos .....	28
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>29</b>
2.1	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA .....	29
2.1.1	Emissões veiculares e monóxido de carbono.....	29
2.1.2	Legislações relacionadas a qualidade do ar .....	30
2.2	MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR.....	31
2.2.1	Redes de monitoramento e dispositivos convencionais ....	32
2.3	DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE GASES POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	33
2.3.1	Medição automática de baixo custo.....	33
2.3.2	Breve histórico dos estudos relacionados a tecnologias de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar .....	37
2.3.3	Calibração de sistemas de medição de gases poluentes....	39
2.3.4	Qualidade do ajuste de modelo de regressão linear .....	41
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
3.1	PROJETO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO .....	43
3.2	IMPLEMENTAÇÃO DO HARDWARE DO PROTÓTIPO	46
3.3	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DO PROTÓTIPO	49
3.4	CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO .....	51
3.4.1	Sistema de medição de CO de referência .....	51
3.4.2	Definição e localização dos pontos de amostragem .....	52
3.4.3	Amostragem dos dados.....	53
3.4.4	Processamento dos dados .....	54
3.4.5	Modelo de regressão linear.....	55
	Modelo de regressão linear de primeira ordem .....	55

3.4.6	Verificação da Qualidade do Ajuste dos modelos .....	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	57
4.1	EXPERIMENTOS E A VERIFICAÇÃO DA NORMALIDADE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR .....	57
4.2	MODELO DE REGRESSÃO LINEAR .....	60
4.3	VERIFICAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR E AS VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS .....	64
4.4	EQUAÇÃO DE TRANSDUÇÃO DO SENSOR MOS .....	65
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	67
	REFERÊNCIAS .....	69
	APÊNDICE A – Lista de Materiais e Orçamento do SMCO .....	71
	APÊNDICE B – Algoritmo de controle do SMCO .....	72
	APÊNDICE C – Algoritmo de Processamento dos Dados .....	80
	APÊNDICE D – Séries temporais dos experimentos de calibração e validação .....	82
	APÊNDICE E – Instruções de uso e operação do SMCO .....	83

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar nas cidades está diretamente influenciada pela presença de veículos automotores (KUMAR, 2013). Atualmente a medição de poluentes atmosféricos é realizada por autoridades ambientais ou governamentais utilizando-se redes de estações de monitoramento fixas contendo instrumentos capazes de amostrar diversos poluentes atmosféricos de forma contínua e precisa. Porém, devido aos altos custos de instalação e operação, existe um pequeno número destas unidades em funcionamento em Santa Catarina, sendo a rede atual consideravelmente esparsa. Essa baixa resolução espacial contribui para maiores erros nas estimativas em pontos situados relativamente distante das estações mais próximas.

As políticas públicas devem ser embasadas em longas séries temporais de dados que possibilitem a obtenção de estatísticas e tendências temporais relacionadas à qualidade do ar. Nesse sentido, o desenvolvimento de sistemas de medição de baixo custo para poluentes atmosféricos tem o potencial de realizar as mesmas medições enquanto captura mais fielmente as realidades locais. Comparados aos métodos de referência definidos nas legislações, o uso destes sistemas pode reduzir os custos associados ao monitoramento da qualidade do ar e permitir uma maior amostragem dos poluentes, mesmo em áreas remotas. Contudo, a verificação da qualidade dos dados gerados por estes sistemas continua sendo um desafio, uma vez que a resposta dos sensores que compõem esses equipamentos de baixo custo depende, dentre outros fatores, das condições atmosféricas e da presença de gases interferentes.

O aumento na concentração de monóxido de carbono na atmosfera tem relação direta com ações antropogênicas como emissões oriundas de atividades industriais e, principalmente, veículos automotores. Daí a crescente necessidade da promoção de monitoramento contínuo dos níveis desse poluente em ambientes próximos às rodovias.

Nesse sentido, este trabalho pretende analisar uma alternativa tecnológica viável para a medição de concentrações de monóxido de carbono utilizando-se sensores semicondutores de óxidos metálicos e eletrônica de baixo custo. Um protótipo portátil foi desenvolvido de modo a medir e armazenar as concentrações do poluente e os parâmetros atmosféricos. A verificação da qualidade da resposta do equipamento projetado foi realizada comparando-se com àquela medida por um sistema de referência com outra tecnologia de medição mais avançada.

O monitoramento da qualidade do ar é necessário para a verificação e controle dos níveis de poluentes a que a população está

exposta, principalmente em localidades com considerável tráfego veicular. A poluição atmosférica está relacionada a uma série de males à saúde da população como problemas cardíacos e no sistema respiratório, com destaque para o CO que em altas concentrações pode levar até mesmo a morte por asfixia. Dessa maneira e devido aos elevados custos associado a instalação, operação e manutenção de estações de monitoramento faz-se necessário o desenvolvimento de sistemas de baixo custo e portáteis que realizem estas medições com qualidade aceitável a custos substancialmente inferiores.

O dispositivo de medição deve ser portátil e de baixo custo e fornecer, como saída principal, uma estimativa da concentração de monóxido de carbono presente na amostra em partes por milhão. De modo a se implementar o sistema é necessário o desenvolvimento de um protótipo para se realizar, na prática, testes de funcionamento, calibração e operação. Para a estimação da concentração de monóxido de carbono (em ppm) faz-se necessário o ajuste da saída do protótipo através de um modelo de regressão linear que relacione a resposta do sensor de monóxido de carbono ao valor “real” de concentração deste poluente.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de baixo custo para medição de monóxido de carbono para monitoramento da qualidade do ar.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Desenvolver um protótipo experimental
- Calibrar o protótipo desenvolvido através de um modelo de regressão linear que relacione a concentração de monóxido de carbono à resposta do sensor de baixo custo
- Validar o modelo encontrado

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA**

A poluição atmosférica está relacionada ao nível de alteração dos padrões físico-químicos e biológicos da camada inferior da atmosfera. Essa mudança pode repercutir negativamente na saúde pública e no bem-estar das populações, além de impactar na fauna, flora e nos materiais. A qualidade do ar é, portanto, o produto da interação de um complexo conjunto de fatores ambientais, dentre os quais destacam-se a composição química dos poluentes, a magnitude das emissões, a topografia e as condições meteorológicas da região (MMA, 2014).

Os efeitos adversos da poluição atmosférica sobre a saúde humana têm sido reportados em muitos estudos realizados nas mais diversas partes do mundo. Dentre alguns destes males estão uma maior incidência de doenças cardiorrespiratórias e diminuição da expectativa média de vida em populações residentes em cidades com altos índices de poluição do ar. Também existem evidências de aumento da mortalidade infantil em áreas sabidamente poluídas. Estes fatos apontam a necessidade da implementação de políticas públicas que promovam a redução dos poluentes no ar em níveis internacionais, nacionais, regionais e locais. Existe, pois, a necessidade da obtenção de informações relacionadas aos efeitos da poluição do ar sobre a saúde pública, uma vez que estas devem servir de base para a definição de estratégias efetivas e científicas para a redução destes efeitos (WHO, 2014).

Os principais poluentes atmosféricos são os (EEA, 2013):

- Percussores de ozônio: CO, NO<sub>x</sub> e VOC.
- Agravadores do efeito estufa: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O.
- Compostos Acidificantes: NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>.
- Materiais particulados: PM.
- Compostos Carcinogênicos: HPA.
- Metais pesados e outras substâncias tóxicas.

Dentre as principais fontes de lançamento de poluentes a atmosfera estão as queimadas e, com maior relevância, as emissões veiculares, embora em algumas áreas fontes estacionárias locais possam ter importante contribuição na concentração ambiente de CO (KUMAR, 2015).

#### **2.1.1 Emissões veiculares e monóxido de carbono**

Os veículos automotores são os principais responsáveis pela emissão de gases poluentes em áreas urbanas. As emissões pelos escapamentos também ocasionam a produção de compostos poluentes secundários, como o O<sub>3</sub>, através de reações fotoquímicas que ocorrem na atmosfera. Dentre os principais fatores que influenciam na carga poluente emitida pelos veículos automotores podemos citar o tipo, combustível utilizado e o grau de deterioração do veículo, dentre outras. O CO é o poluente dominante das emissões decorrentes dos engarrafamentos urbanos (ZHANG, 2013).

O monóxido de carbono emitido pelos escapamentos pode acarretar diversos males a saúde, uma vez que possui alta afinidade com as moléculas de hemoglobina que são responsáveis pelo transporte de oxigênio as células. Estudos relacionam este poluente a problemas cardíacos, nos sistemas nervoso central, respiratório e reprodutivo e no desenvolvimento pré-natal. O nível de carboxihemoglobina no sangue é um indicador capaz de quantificar o grau de exposição (US-EPA, 2010).

### **2.1.2 Legislações relacionadas a qualidade do ar**

No Brasil a Resolução CONAMA N°3/1990 dispõe sobre os Padrões de Qualidade do Ar previstos no PRONAR (1989). Esta resolução foi criada levando-se em consideração a necessidade de ampliar o número de poluentes atmosféricos passíveis de monitoramento e controle, dado que a Portaria GM 231/1976 impõe o estabelecimento de novos padrões de qualidade do ar caso se tenha informação científica a respeito. A CONAMA 03 define que

[...] padrões de qualidade são as concentrações de poluentes que, se ultrapassadas, podem ocasionar danos à saúde pública, à segurança e o bem-estar da população, bem como causar danos à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Ficam estabelecidos os conceitos de padrões primários e secundários da qualidade do ar, sendo aqueles relativos ao mínimo efeito à saúde da população, enquanto estes relacionados ao mínimo dano à flora, à fauna, aos materiais e ao meio ambiente, além da saúde da população. Segundo a CONAMA 03, os padrões de qualidade do ar seus respectivos métodos e análise de referência são:



- partículas totais em suspensão através de amostradores de grandes volumes.
- fumaça através da refletância.
- partículas inaláveis através de filtração.
- dióxido de enxofre através da pararonasilina.
- monóxido de carbono através de infravermelho não dispersivo.
- ozônio e dióxido de nitrogênio através da quimioluminescência

Métodos equivalentes aos de referência podem ser adotados desde que aprovados pelo IBAMA.

A Resolução também define os Níveis de Atenção, Alerta e Emergência para a elaboração do Plano de Emergências para Episódios Críticos de Poluição do Ar, visando a tomada de providências por parte dos órgãos governamentais, entidades privadas e comunidade em geral no tocante à prevenção a graves e iminentes riscos à saúde da população. Em se tratando do CO, a resolução CONAMA 03 estabelece como padrões primários e secundários, para médias de 8 horas e 1 hora, concentrações iguais a 9 ppm e 35 ppm respectivamente, não podendo ser excedidas mais de uma vez por ano. Os níveis de atenção, alerta e emergência para médias de 8 horas são respectivamente de 15 ppm, 30 ppm e 40 ppm.

## 2.2 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

Segundo a CONAMA 01, entende-se por monitoramento ambiental como o

[...] conjunto de procedimentos e técnicas destinados a mensuração de variáveis ambientais (sejam elas relativas ao ar, solo, água e resíduos sólidos dentre outros) objetivando o mapeamento, análise e posterior utilização dos dados, permitindo que a informação seja utilizada para a tomada de decisão por órgãos competentes, de modo a garantir níveis aceitáveis e conhecidos de poluição na biosfera.

O monitoramento da qualidade do ar está relacionado a medição e quantificação das concentrações dos poluentes no ar do ambiente onde as pessoas, animais e plantas estão expostos, podendo afetar sua saúde, visibilidade e provocar danos materiais. Dentre os principais objetivos de um processo de monitoramento podemos citar (FRONDIZI, 2008):

- Determinar as concentrações mais altas na região em estudo.
- Determinar as concentrações nas regiões de maior concentração ou densidade demográfica.
- Determinar o impacto de uma grande fonte emissora ou grupo de fontes em um mesmo local.
- Subsidiar medidas de planejamento e controle de modo a auxiliar na definição de políticas ambientais e investimentos e avaliar os resultados de planos, programas e projetos para manter ou recuperar os recursos naturais.

A verificação da qualidade do ar em determinada área ou local depende de um conjunto de fatores incluindo a distribuição espacial da rede e do entendimento acerca da importância da contribuição de fontes pontuais sobre os níveis de poluentes.

### **2.2.1 Redes de monitoramento e dispositivos convencionais**

Uma rede de monitoramento atmosférico consiste em duas ou mais estações de medição da qualidade do ar estabelecidas em uma dada região geográfica onde medidas periódicas regulares de concentração de poluentes e parâmetros meteorológicos são feitas, simultaneamente, para determinar a natureza e a extensão da poluição atmosférica e estabelecer as tendências das concentrações dos poluentes ao longo do tempo. As redes de monitoramento podem representar, basicamente, três escalas espaciais:

- I. Microescala, onde os dados representam concentrações em um raio de 100m da estação. No caso do CO, é recomendado que os equipamentos devem ser posicionados entre 2 – 10 m da via pública. As medições tentam representar o ambiente próximo à rodovia.
- II. Escala média, onde os dados representam concentrações médias por área entre 100 – 500 m<sup>2</sup>. Estas medições tentam representar grandes blocos da cidade.
- III. Macroescala, onde os dados têm por objetivo representar concentrações médias de áreas entre 0.5 – 4.0 km<sup>2</sup>.

Os níveis de exposição pública aos poluentes atmosféricos vêm sendo convencionalmente obtidos via filtros amostradores de grande volume, contadores de partículas e tubos absorventes. Estes métodos possuem funcionamento simples e medições precisas. Contudo, uma vez que cada filtro ou tubo absorvente deve amostrar por horas ou dias ininterruptamente, importantes informações relacionadas as séries

temporais de dados são perdidas quando estes métodos são utilizados (PIEDRAHITA, 2014).

## 2.3 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE GASES POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Atualmente há, ao redor do mundo, uma tendência crescente na utilização de sistemas de medição da qualidade do ar alternativos para complementar os dados obtidos via estações de monitoramento fixas regulamentares. Estes dispositivos vêm sendo desenvolvidos a ritmo acelerado nos últimos anos devido a aprimoramentos nos processos de fabricação dos sensores e eletrônica necessária (PIEDRAHITA, 2014). Os sensores são apenas uma parte do sistema de medição, que precisa necessariamente de uma placa de controle eletrônico capaz de interligar as diversas partes que formam o dispositivo: como o armazenamento, a visualização, o processamento, o condicionamento do sinal oriundo dos sensores e o envio dos dados, dentre outros.

Sistemas de monitoramento da qualidade do ar de baixo custo podem ser utilizados para implementação de densas redes de monitoramento, instalados em automóveis ou mesmo nas roupas de modo a possibilitar a obtenção de mapas de qualidade do ar com alta resolução espaço-temporal. Atualmente estamos vivenciando uma mudança de pensamento em relação a como e quem pode monitorar a qualidade do ar. Muito disso deve-se ao fato desses novos sistemas serem relativamente mais baratos, fáceis de operar e menos volumosos que os sistemas de monitoramento convencionais, além de possibilitar que a comunidade infira sobre a qualidade do ar local que afeta diretamente sua saúde.

Porém, de modo a permitir a utilização dos dados gerados pelos sistemas de medição de baixo custo faz-se necessário uma análise detalhada em relação a parâmetros operacionais como a reprodutibilidade e correções devido às condições atmosféricas e gases interferentes, dentre outras especificidades. Em suma, o principal desafio das tecnologias associadas ao desenvolvimento de sistemas de baixo custo reside em garantir que os dados gerados sejam confiáveis e passíveis de verificação pelos respectivos órgãos regulatórios (LEWIS, 2016).

### 2.3.1 Medição automática de baixo custo

Muitas tecnologias têm sido desenvolvidas e utilizadas na medição dos poluentes atmosféricos. Atualmente, a necessidade por sensores de alta sensibilidade e baixo custo tem crescido significativamente devido ao

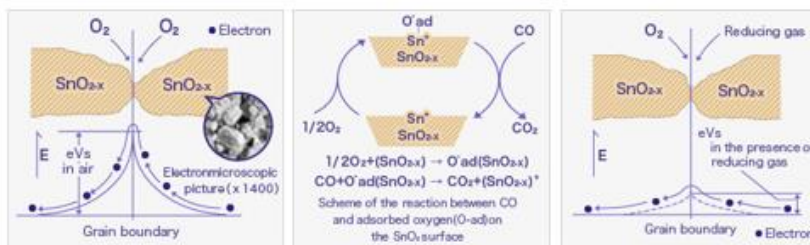
aumento progressivo dos níveis de poluentes na atmosfera, principalmente em função do aumento da frota veicular (KUMAR, 2015). Métodos avançados para medição de concentrações de poluentes utilizam tecnologias robustas como espectrometria de massa e cromatografia gasosa. Dentre as tecnologias mais viáveis e susceptíveis ao uso em monitoramento ambiental automático de baixo custo destacam-se atualmente os sensores eletroquímicos e os semicondutores de óxidos metálicos (KOROTCENKOV, 2014). O desempenho destes sensores é avaliado em função de diversos parâmetros operacionais, tais como a sua seletividade, faixa de medição, sensibilidade e tempo de resposta, dentre outros. Em se tratando dos limites de concentração de CO presentes na CONAMA 03 (35 ppm para médias de 1h e 9 ppm para médias de 8h), sensores com resolução de 1 ppm são suficientes para o devido monitoramento. Porém, devido aos níveis médios deste poluente serem inferiores na maior parte do tempo a esse valor, é desejável que os sensores possuam sensibilidade na faixa do ppb (US – EPA, 2010).

#### Sensores de óxidos metálicos (MOS)

Sensores MOS são basicamente dispositivos elétricos que variam sua resistência em função da presença de gases. A condutividade da camada ativa é alterada devida a fenômenos de adsorção relacionados a temperatura e composição de gases da atmosfera. Estes sensores operam em elevadas temperaturas no intuito de acelerar a adsorção e reduzir os efeitos da instabilidade térmica. A Figura 1 apresenta o princípio de operação destes sensores. A camada ativa é formada por uma fina camada de material semicondutor a base de óxidos metálicos, como o  $\text{SnO}_2$ , e um filamento aquecedor. Sua temperatura típica de funcionamento é na faixa entre  $300^\circ\text{C}$  e  $900^\circ\text{C}$ , dependendo do tipo de gás e das características construtivas do sensor (KOROTCENKOV, 2014). No caso extremo de ausência de oxigênio, quando a superfície sensível é aquecida elétrons livres fluem livremente pelos cristais de dióxido de estanho ( $\text{SnO}_2$ ). O oxigênio fica adsorvido na superfície de óxidos metálicos. Devido a sua alta afinidade aos elétrons, o oxigênio adsorvido atrai estes elétrons livres para dentro da camada de óxidos metálicos formando uma barreira de potencial (eVs no ar) nas bordas dos grãos. Esta barreira reduz o fluxo de elétrons, causando aumento significativo da resistência do elemento sensor. Quando o sensor é exposto a gases redutores (como o CO) ocorrem reações de oxidação destes com o oxigênio adsorvido na camada de  $\text{SnO}_2$ . Como resultado, a densidade de oxigênio adsorvido na camada sensível diminui. A altura da barreira de potencial é reduzida, de modo

que os elétrons fluem facilmente resultando na redução da resistência elétrica do sensor. Portanto, concentrações de gases no ar podem ser estimadas pela medição da alteração da resistência elétrica dos sensores de gás do tipo MOS.

Figura 1 - Princípio de operação dos sensores semicondutores de óxidos metálicos



Fonte: Disponível em: <

<http://www.figarosensor.com/technicalinfo/principle/mos-type.html>

(FIGARO USA, 2016, s/p).

Os sensores MOS são a solução de medição de gases com mais baixo custo, porém trazem consigo desafios significativos de quantificação. A resposta destes sensores é não-linear em relação a concentração de gás e são afetados pela temperatura e umidade relativa. Deslocamento da linha de base e alterações na sensibilidade ao longo do tempo também são comuns nestes sensores, muito disso devido a alterações na temperatura de funcionamento e envenenamento da superfície sensível. Assim, para utilizar-se os sensores MOS de maneira quantitativa, faz-se necessário que os modelos levem em conta não somente a resposta do sensor, mas também o impacto dos demais fatores interferentes sobre a resposta (LEWIS, 2016).

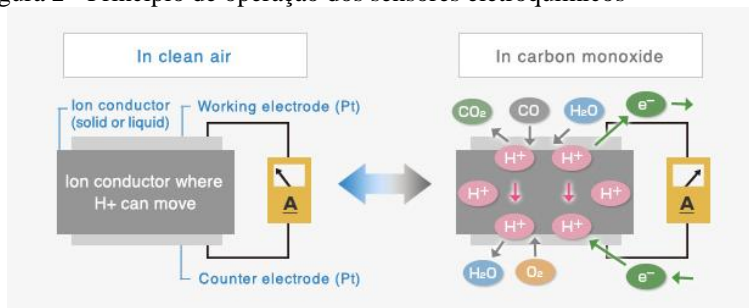
### Sensores eletroquímicos (EC)

Os sensores eletroquímicos medem a concentração de um gás devido as reações de oxidação ou redução que ocorrem em seus eletrodos. Basicamente, estas reações químicas dão origem a uma corrente elétrica entre os eletrodos, cuja qual é proporcional a concentração de gases. Um sensor eletroquímico típico é formado pelos chamados eletrodos de trabalho e contador, sendo estes separados por uma fina camada de eletrólitos (MIKOŁAJCZYK, 2016).

O gás a ser medido ultrapassa uma fina barreira física e então se difunde através de uma superfície hidrofóbica até alcançar a superfície do eletrodo de trabalho. Nesse momento, reações de oxidação ou redução químicas podem ocorrer neste eletrodo, dependendo do tipo de gás. Por exemplo, o CO pode ser oxidado a  $\text{CO}_2$  no eletrodo de trabalho, enquanto o oxigênio é reduzido a água no eletrodo contador. Caso estes eletrodos sejam interligados por um material condutor, estas reações resultam em movimento de elétrons e cargas positivas do eletrodo de trabalho para o contador. Caso ocorram reações de redução, o sentido de fluxo de elétrons e cargas positivas é revertido. Estes fluxos constituem uma corrente elétrica que é proporcional à concentração do gás (MIKOŁAJCZYK, 2016).

Infelizmente, na prática estes sensores sofrem de sensibilidade cruzada, podendo apresentar resultados incoerentes quando na presença de vários gases. Se ultrapassadas estas barreiras, seus resultados são bastante lineares e confiáveis, além de possuírem um tempo de vida útil de vários anos. A Figura 2 apresenta um esquema do princípio de funcionamento de um sensor eletroquímico de CO.

Figura 2 - Princípio de operação dos sensores eletroquímicos



Fonte: Disponível em: <

<http://www.figarosensor.com/technicalinfo/principle/electrochemical-type.html> (FIGARO USA, 2016, s/p).

A seguir é feita uma breve revisão da literatura acerca do monitoramento de baixo custo, com ênfase nos trabalhos relacionados à medição de CO, tentando apresentar os trabalhos em ordem cronológica.

### **2.3.2 Breve histórico dos estudos relacionados a tecnologias de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar**

Esta seção tem por objetivo apresentar uma visão geral utilizando-se trabalhos técnicos acerca do desenvolvimento de tecnologias alternativas de baixo custo para o monitoramento automático da qualidade do ar, com destaque àqueles relacionados ao estudo do CO.

J. Watson (1990) estudou a resposta de sensores do tipo MOS a diferentes concentrações de monóxido de carbono. Desenvolveu um monitor de baixas concentrações capaz de realizar amostragens contínuas ao longo do tempo.

Rada (2012) realizou um estudo de viabilidade da utilização de sensores eletroquímicos para medição de gases poluentes atmosféricos. Concluiu que os sensores analisados foram precisos na detecção e medição de concentrações de vários compostos poluentes, dentre eles o monóxido de carbono, sendo adequados para utilização no monitoramento da qualidade do ar.

Aleixandre (2012) realizou uma análise minuciosa da resposta de sensores MOS existentes no mercado. Concluiu que sensores possuem boa sensibilidade ao CO. Porém, com inerentes problemas de repetitividade e estabilidade, fazendo-se necessário ajustes dos dados para devida utilização em função da aplicação.

Mead (2013) avaliou o desempenho de sensores de baixo custo na medição de concentrações reduzidas de alguns poluentes, entre os quais o CO. Verificou que os sensores eletroquímicos podem fornecer dados confiáveis das concentrações em ppb com baixo nível de ruído e elevada linearidade, tornando-os adequados para medições da qualidade do ar. Demonstraram ainda que as redes de sensores de baixo custo são viáveis para monitoramento de diversos poluentes atmosféricos e que podem ser utilizadas como complemento de outras técnicas de medição convencionais.

Suriano et al. (2014) desenvolveu um dispositivo portátil para monitoramento dos diversos gases poluentes atmosféricos, dentre eles o CO. Foram utilizados sensores eletroquímicos de baixo custo como elementos sensitivos, além de sensores para medição de temperatura e umidade relativa. A validação do sistema de medição foi obtida via comparação com uma estação regulamentada contendo analisadores químicos com gases padronizados. Ficou comprovado boa precisão do sensor de CO eletroquímico utilizado quando comparado ao equipamento de referência. Todos os sensores demonstraram interferência cruzada significativa ao ozônio.

Kumar (2014) realizou um estudo acerca do progresso no campo do monitoramento da qualidade do ar utilizando sistemas de baixo custo. O autor destaca que abordagens convencionais para monitoramento da qualidade do ar estão baseadas em redes de estações de monitoramento estáticas e esparsas. Desse modo, há um custo proibitivo em capturar a intrínseca heterogeneidade tempo-espacial da atmosfera e identificar pontos específicos com maiores concentrações de poluentes, informações estas essenciais para o desenvolvimento de estratégias efetivas para combate e controle à exposição a poluentes. Nesse sentido, o avanço atual das técnicas de monitoramento atmosférico de baixo custo vem mudando radicalmente a maneira convencional de aquisição de dados, permitindo dentre outras vantagens a disseminação dos dados adquiridos em tempo real a relativos baixos custos.

Spinelle (2014) realizou um estudo utilizando um grupo de sensores de baixo custo capazes de medir  $O_3$ ,  $NO/NO_2$ ,  $CO$  e  $CO_2$ . Comparou o desempenho de vários métodos de calibração, dentre eles regressões lineares univariáveis e multivariáveis e redes neurais artificiais. O objetivo dos estudos foi determinar se as incertezas de medição dos sensores podem cumprir as normas da qualidade dos dados exigidas pela Agência Europeia de Qualidade do Ar. Concluíram que as incertezas nas respostas dos sensores foram menores utilizando-se uma rede neural artificial como modelo de calibração, quando comparado aquelas obtidas por métodos de regressão linear.

Lewis (2016) realizou um estudo acerca da validação dos dados de sensores de baixo custo para medição da qualidade do ar. Um sistema de medição de  $PM$ ,  $SO_2$  e  $NO_2$  foi implementado. Concluíram que a entrada destes tipos de dispositivos no domínio público pode gerar grandes volumes de dados talvez não testados e um tanto questionáveis, de modo que se faz necessário avanços na área química de modo a possibilitar que estas tecnologias alcancem seu potencial e confiabilidade máximos.

Al Barakeh (2016) implementou um sistema de monitoramento portátil de gases poluentes utilizando nove sensores do tipo MOS comerciais capazes de medir diversos compostos gasosos, além da temperatura e umidade relativa.

Castell (2017) realizou uma análise experimental de 24 sensores MOS comerciais de baixo custo, comparando os resultados destes com analisadores de referência sob condições ambientais diferenciadas. Os resultados mostraram que o desempenho destes sensores varia espacial e temporalmente, evidenciando uma dependência da composição atmosférica e condições meteorológicas sobre as medições. Além disso, os estudos comprovaram que o desempenho dos sensores varia de unidade



para unidade, tornando necessário um exame adequado da qualidade dos dados de cada sensor antes de sua utilização para a obtenção das informações acerca dos poluentes.

Assim sendo, fica evidenciado a necessidade de maiores estudos relacionados à medição de poluentes atmosféricos. Os sensores eletroquímicos se mostram mais adequados quanto a precisão e rapidez de suas respostas, se comparados aos sensores de óxidos metálicos. Porém tem um custo pelo menos uma ordem de grandeza superior aos semicondutores. Faz-se então necessário maiores estudos e avanço tecnológico relacionados aos semicondutores de óxidos metálicos de modo a verificar a possibilidade de sua utilização no monitoramento da qualidade do ar.

### **2.3.3 Calibração de sistemas de medição de gases poluentes**

O termo calibração é aqui utilizado como a ação de estimar a concentração do poluente em função dos dados adquiridos nas medições dos sensores do gás poluente e atmosféricos. Existem basicamente duas maneiras de se calibrar um instrumento de medição. A primeira é fazer as calibrações utilizando gases padrões certificados, na qual concentrações conhecidas são aplicadas ao sistema em testes laboratoriais. A segunda é fazer a comparação com instrumentos de referência que foram devidamente calibrados com padrões certificados. Este tipo de calibração pode ser realizado colocando-se o sistema próximo a estações de monitoramento regulamentadas pelas autoridades.

A Figura 3 apresenta um diagrama de blocos mostrando as entradas e saídas de um equipamento de medição que tem por objetivo estimar concentrações de CO a partir da resposta de um sensor tipo semicondutor de óxidos metálicos e das variáveis atmosféricas. Dentre os principais componentes desse sistema podemos citar os sensores, os sistemas eletrônicos para aquisição de dados e o modelo de regressão linear. O modelo consiste em uma curva que relaciona a resposta do sensor de baixo custo à concentração de monóxido de carbono medida pelo sistema de referência.

#### **Sensores utilizados para a medição da qualidade do ar**

Os sensores são elementos de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, campo ou substância fornecendo uma quantidade a ser medida. Sensores que alteram sua condutividade elétrica são bastante comuns e apresentam como resposta um sinal em

forma de tensão elétrica passível de medição por sistemas de aquisição de dados. Há sensores capazes de fornecer suas informações na forma de valores com unidades específicas como, por exemplo, °C e hPa para sensores de temperatura e pressão, respectivamente, mas necessitam de eletrônica adicional para tanto.

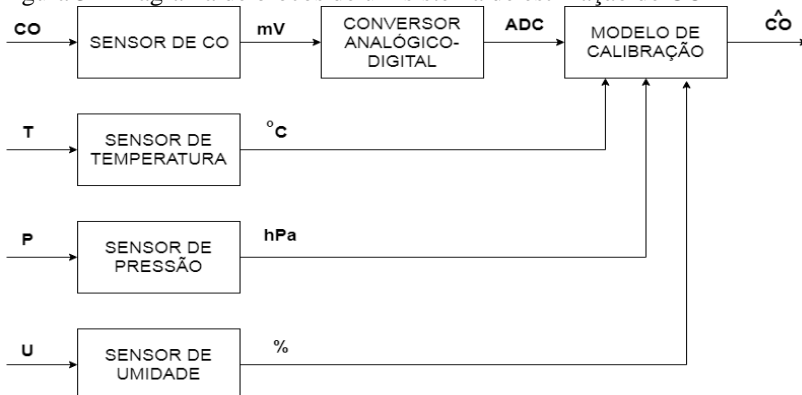
### Aquisição de dados analógicos de sensores

O processo de aquisição de dados de sensores analógicos é realizado com a utilização dos chamados conversores analógico-digitais (ADC). Estes elementos têm a capacidade de mapear um sinal de tensão elétrica para um intervalo de valores determinados estabelecido de acordo com sua resolução. Um ADC de 10 bits é capaz de gerar um intervalo de números inteiros entre 0 – 1023, por exemplo, enquanto um de 16 bits entre 0 – 65535. Quanto maior a resolução do ADC melhor sua sensibilidade.

### Processamento das informações de sensores

O processamento das informações de múltiplos sensores tem a finalidade de calcular as estimativas de uma dada variável analisada em função das medições dos sensores. Por exemplo, a estimativa da concentração de CO pode levar em consideração a resposta de um sensor analógico e outras variáveis tais como temperatura, pressão atmosférica, umidade, gases interferentes e termos decorrentes do tempo de funcionamento, dependendo das características de cada sensor.

Figura 3 - Diagrama de blocos de um sistema de estimação de CO



Fonte: Autoria própria.

### 2.3.4 Qualidade do ajuste de modelo de regressão linear

Após a aquisição dos dados de calibração e validação pelo SMCO, faz-se necessário o relacionamento das informações na forma dos chamados modelos de regressão linear. Estes possuem coeficientes que precisam ser estimados de modo a minimizar o erro entre as estimativas do equipamento e os valores de referência. Existem basicamente dois métodos de avaliação da qualidade dos ajustes dos coeficientes dos modelos: o gráfico e o numérico. A plotagem dos erros residuais entre as previsões do modelo e o valor de referência é uma alternativa gráfica que ajuda na análise visual, enquanto que o cálculo de parâmetros estatísticos numéricos serve de base quantitativa ao raciocínio estatístico (MATHWORDS, 2018). A seguir é feita uma breve definição dos parâmetros estatísticos numéricos utilizados nesse trabalho.

#### Coeficiente de determinação ( $R^2$ )

Esta estatística indica o quão bom o modelo é em explicar a variação dos dados. Trata-se do quadrado da correlação entre os valores de referência e os estimados pelo modelo. Também pode ser chamado de coeficiente de correlação ou determinação múltipla.

O coeficiente de correlação é definido como a soma dos quadrados da regressão (SSR) e do somatório dos quadrados. SSR é definido como

$$SSR = \sum_1^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad (1)$$

onde  $\bar{y}_i$  equivale a média aritmética das  $n$  medições e  $\hat{y}_i$  a estimativa. SST é conhecido como a soma dos quadrados em relação à média e é dado por

$$SST = \sum_1^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (2)$$

onde SST é a soma de SSR com SSE. Dadas estas definições,  $R^2$  é definido como

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3)$$

onde  $R^2$  é um número real no intervalo entre 0 e 1. Valores próximos a 1 indicam que uma grande proporção da variação foi contabilizada pelo modelo. Por exemplo, um valor de 0.752 significa que o modelo explica 75,2% do total da variação dos dados em relação à média amostral.

#### Raiz da média dos erros residuais quadráticos (RMSE)

Esta estatística é também conhecida como erro padrão ou erro padrão da regressão. Trata-se de uma estimativa do desvio padrão da componente aleatória do erro e é definida como

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (4)$$

onde MSE é o erro médio quadrático, também conhecido como erro médio residual dado por

$$MSE = \frac{SSE}{n} \quad (5)$$

Assim como o SSE, um valor de MSE próximo ao zero indica que o modelo é bastante propício a fazer boas estimações.

#### Média aritmética dos erros residuais

Esta estatística, também conhecida como erro residual médio, indica o valor médio das diferenças entre os valores de referência e os estimados pelo modelo. É calculado como

$$bias = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (6)$$

Assim como o SSE, valores próximos a zero indicam um bom ajuste do modelo aos dados de referência.

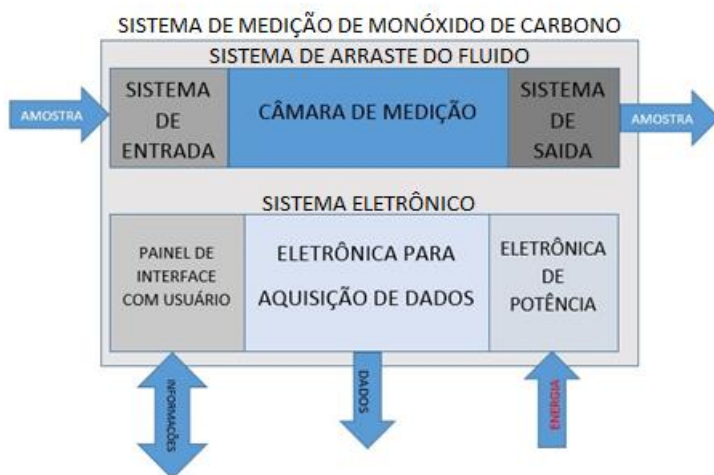
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do sistema de medição de baixo custo está dividido em três etapas principais: o desenvolvimento, a calibração e a validação do protótipo. O desenvolvimento do protótipo é subdividido em três fases: o projeto, a implementação do *hardware* e o desenvolvimento do *software* do dispositivo, sendo estas realizadas entre agosto e setembro de 2017 nas dependências do LCQAr. As etapas de calibração e validação do protótipo são subdivididas ambas em duas fases: a realização de experimentos e o posterior processamento dos dados, realizadas entre março e abril de 2018. A seguir é feita uma breve descrição dos sistemas que compõem o protótipo desenvolvido e seus respectivos subsistemas e componentes.

#### 3.1 PROJETO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO

O protótipo do sistema de medição de baixo custo é dividido em dois sistemas: arraste do fluido e eletrônico. O sistema de arraste é responsável por promover o fluxo gasoso da amostra através da câmara de medição, cuja qual abriga em seu interior os sensores de CO, umidade relativa, temperatura e pressão atmosférica. O fluxo gasoso pela câmara é promovido pelos subsistemas de entrada e saída da amostra, podendo estes realizarem a filtração da amostra para remoção, por exemplo, de umidade, poeira ou mesmo outros gases interferentes. No protótipo, os subsistemas de entrada e saída são formados basicamente por ventoinhas e mangueiras. O sistema eletrônico é responsável pelo funcionamento e controle de todo o dispositivo, incluindo-se: aquisição, processamento e armazenamento das informações provenientes dos sensores e demais componentes eletrônicos; interação com os usuários através de um painel de controle e adequação dos níveis de potência necessários a alimentação elétrica de cada componente do sistema, como esquematizado na Figura 4, que mostra o SMCO e seus subsistemas, destacando o sentido do fluxo gasoso através do sistema de arraste e do fluxo de informações, dados e energia através do sistema eletrônico.

Figura 4 - Sistema de medição de monóxido de carbono



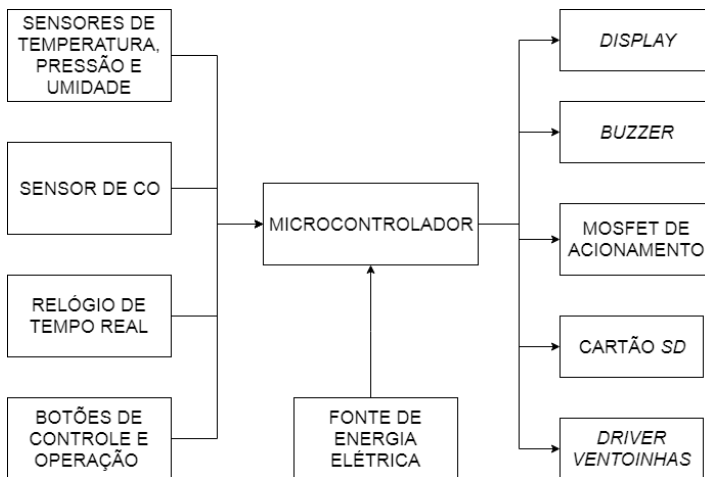
Fonte: Autoria própria.

O usuário pode controlar o sistema através de uma interface contendo um *display* e três botões, permitindo as ações de ligar ou desligar a energia do sistema; alterar o modo de operação e iniciar a operação do equipamento. Os modos de operação disponíveis são: Preparo e Aquisição. Em Modo Preparo, o sistema aquece o sensor de CO e remove quaisquer outros gases presentes na câmara durante uma hora. Este intervalo de tempo é o mínimo necessário, indicado pelo fabricante, para que o sensor atinja condições ideais de operação. No Modo Aquisição o sistema faz uma amostragem seguida de gravação em arquivo dos dados provenientes dos sensores a cada minuto. Cálculos aproximados mostram que este período de amostragem é suficiente para aquisição de informações por uma semana de armazenamento contínuo utilizando-se um cartão SD com de 2 GB de capacidade.

O subsistema eletrônico para aquisição de dados tem como elemento principal um microcontrolador capaz de controlar todo o sistema baseado em uma lógica de programação. A Figura 5 mostra um esquemático do conjunto de componentes eletrônicos necessários à implementação do protótipo do SMC. Os dados coletados pelo microcontrolador a cada amostragem são: saída do sensor de CO (mV), temperatura (°C), pressão atmosférica (hPa), umidade relativa (%), data e hora das medições. Ao microcontrolador também cabe as tarefas de armazenar e apresentar os dados coletados, emitir sinais sonoros ao longo

da operação do equipamento e controlar o sistema de arraste. A relação de todos os componentes eletrônicos utilizados no protótipo encontra-se disponível no Apêndice A.

Figura 5 - Componentes eletrônicos do protótipo do SMCO

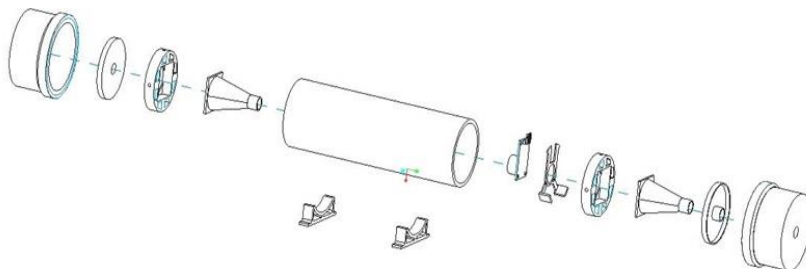


Fonte: Autoria própria.

O subsistema eletrônico de potência é responsável por fornecer energia em forma e nível adequados a todos os componentes do sistema eletrônico de aquisição de dados, sendo formado basicamente por reguladores de tensão, *drivers* de potência e dissipadores de calor.

De modo a permitir a definição e dimensionamento dos componentes necessários à confecção da câmara de arraste, foi utilizada uma ferramenta computacional (*software* CREO 3.0) para modelagem tridimensional das peças, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Projeto do sistema de arraste



Fonte: Autoria própria.

Com os componentes da câmara de arraste e dispositivos eletrônicos necessários ao funcionamento do SMCO devidamente definidos, a etapa seguinte consiste em implementar os projetos descritos através de um modelo físico do equipamento, o *hardware* do protótipo.

### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO HARDWARE DO PROTÓTIPO

O *hardware* do protótipo é basicamente formado pela câmara de medição, estruturas de suporte e componentes eletrônicos. A câmara de medição tem formato cilíndrico (PVC DN40) e abriga em seu interior os sensores de CO (MQ7), temperatura e pressão atmosférica (BMP280) e umidade relativa (DHT11), além de duas ventoinhas (12V-500mA) responsáveis pela entrada e saída da amostra gasosa no sistema. Dentre as principais razões que fazem do MQ7 utilizado no protótipo do SMCO ser considerado um sensor de baixo custo quando comparado ao sistema de referência são: seu elevado tempo de estabilização, a falta da compensação de temperatura, a não-linearidade da resposta em função da concentração e seu alto consumo energético. As peças que servem como suportes para os sensores, ventoinhas, mangueiras e câmara foram construídas em PLA utilizando um *software* de fabricação (RepetierHost) controlando uma impressora 3D (MiniFabrikator v1.0).

De modo a promover a estanqueidade da câmara de arraste foi utilizado silicone nas juntas das peças durante a etapa de montagem, conforme pode ser visto na Figura 7, onde à esquerda é feita a colocação do sensor de CO e sua peça suporte, no centro a instalação do conjunto da ventoinha de saída e mangueira e à direita o encaixe da tampa de saída, evidenciando a aplicação de silicone na junta para garantir a vedação



necessária à câmara. Mangueiras plásticas de 10 mm foram instaladas na entrada e saída do sistema de arraste do fluido.

Figura 7 - Montagem do sistema de arraste do fluido



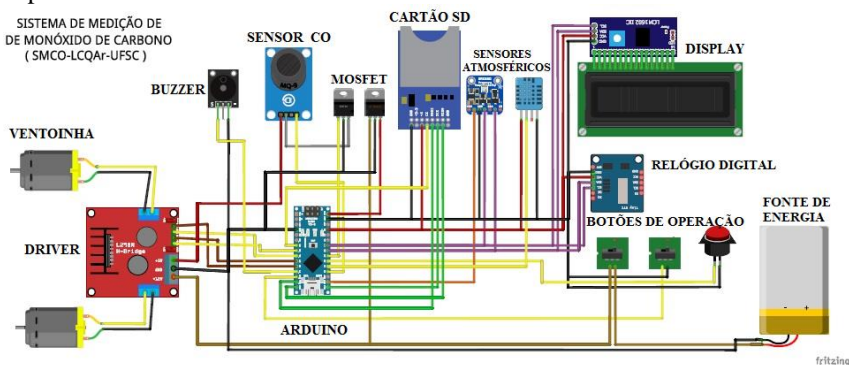
Fonte: Autoria própria.

Um painel de comando contendo três botões e um *display* de cristal líquido (LCD 16x4) possibilita o controle do sistema por parte do usuário. Foi utilizado um transistor (STP55NF06L) para controlar a circulação de corrente elétrica através do filamento do sensor de CO, permitindo futuros estudos que correlacionem a resposta do sensor à temperatura e tipo de excitação do filamento. De maneira semelhante, foi utilizado um *driver* de potência (LM298) para controlar a velocidade das ventoinhas, possibilitando futuros estudos que correlacionem a resposta do sensor à vazão de amostragem. Um *buzzer* ativo (5V) é responsável por emitir sinais sonoros indicativos do andamento das operações do sistema aos usuários. A data e hora das medições foram obtidas através de um relógio de tempo real (DS1307) contendo uma bateria recarregável de 3.6V (LIR2032). Para controlar o funcionamento de todo o sistema, foi utilizada uma placa de desenvolvimento eletrônico (ARDUINO NANO), cujo principal componente é um microcontrolador (ATMEGA-328P) capaz de receber os sinais analógicos e digitais provenientes dos sensores e coordenar as ações necessárias a serem tomadas em função do modo de operação selecionado. O sistema é alimentado por uma fonte de tensão contínua (ou bateria) de 12V capaz de fornecer, pelo menos, 2A. Um regulador de tensão (LM7806), acoplado a um trocador de calor, foi utilizado para fornecer a energia em níveis adequados ao microcontrolador a partir da fonte de alimentação.

De modo a se determinar as conexões necessárias entre os componentes eletrônicos do protótipo do SMC foi utilizada uma ferramenta computacional para montagem de circuitos elétricos (*software* Fritzing). O circuito resultante pode ser visto na Figura 8, que mostra um

esquemático dos componentes eletrônicos do SMCO e suas respectivas conexões elétricas.

Figura 8 - Ilustração do sistema eletrônico do protótipo do SMCO com suas respectivas conexões elétricas



Fonte: Autoria própria.

A câmara de arraste e o sistema eletrônico foram alojadas em uma caixa de material plástico com dimensões apropriadas. Isopor (DEPRON) de 6mm foi utilizado na composição das estruturas de suporte dos sistemas eletrônicos e câmara de arraste, além da tampa superior do protótipo do SMCO, como apresentado na Figura 9, que mostra à esquerda a visão exterior do protótipo desenvolvido e à direita a visão interior do equipamento, evidenciando a câmara de medição, a eletrônica utilizada e o painel de comando.

Figura 9 - Hardware do protótipo do SMCO desenvolvido



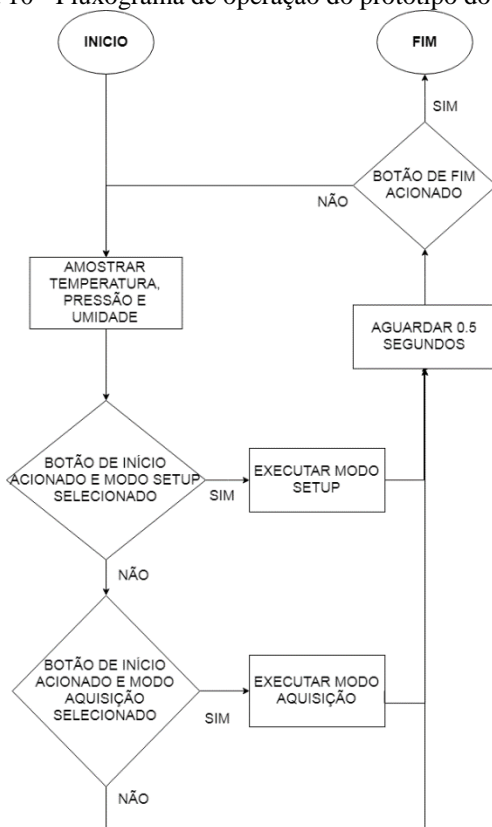
Fonte: Autoria própria.

Com o *hardware* devidamente implementado, a próxima etapa consiste em desenvolver o *software* para controle do funcionamento do protótipo.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE DO PROTÓTIPO

O *software* capaz de controlar o equipamento foi elaborado com base no fluxograma de operação apresentado na Figura 10 e no diagrama do sistema eletrônico do SMCO mostrado na Figura 8. A comunicação do microcontrolador com o sensor de temperatura e pressão atmosférica, tela de cristal líquido e relógio de tempo real dá-se pelo protocolo I2C, enquanto o módulo contendo o cartão SD utiliza comunicação via protocolo SPI. Os sensores de CO e umidade são sinais analógicos que representam números inteiros entre 0 e 1023 em consequência da presença de um conversor analógico digital de 10 bits. Este valor pode ser diretamente transformado em um sinal de tensão elétrica, em Volts. O driver de potência, *buzzer*, transistor e botões funcionam com sinais digitais, podendo estar simplesmente ligados ou desligados. Para comunicação do microcontrolador com o computador (para possíveis alterações de parâmetros de funcionamento do sistema em campo, tais como tempo total e período de amostragem quando em Modo Aquisição ou tempo total de preparo quando em Modo Preparo) foi utilizado o protocolo de comunicação *serial*. A Figura 10 mostra o fluxograma geral de operação do SMCO, apresentando a sequência de operações a serem executadas pelo protótipo em função de seu estado atual e posição dos botões do painel de controle. O manual de instruções e operação do SMCO é apresentado no Apêndice E.

Figura 10 - Fluxograma de operação do protótipo do SMCO



Fonte: Autoria própria.

Para gerar, compilar e gravar o algoritmo de controle no microcontrolador, foi utilizado uma ferramenta computacional de desenvolvimento eletrônico (IDE Arduino v1.8.3) que utiliza a linguagem de programação C. O carregamento do código ocorre através de um cabo USB conectado a um computador. O algoritmo de controle (ou código-fonte ou *firmware*) do protótipo foi desenvolvido utilizando-se como base o fluxograma da Figura 10 e programado em Linguagem C, como pode ser visto no Apêndice B.

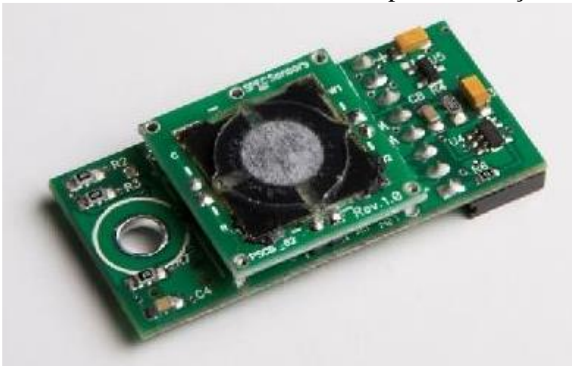
### 3.4 CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO

A ideia por trás da calibração é converter o valor da resposta do sensor MOS, que é um sinal em miliVolts, para unidades de ppm através de um modelo de regressão linear. Existem basicamente duas maneiras de calibrar o instrumento. A primeira é calibrar o equipamento utilizando padrões certificados, onde concentrações conhecidas do poluente são aplicadas sobre o sistema. A segunda é calibrar o sistema utilizando um instrumento de referência que foi calibrado com um padrão certificado. Portanto, um modelo de regressão linear pode ser encontrado comparando-se as medições dos sensores do SMCO com as àquelas aferidas por um sistema de referência desde que os dados experimentais sigam distribuições normais de probabilidade.

#### 3.4.1 Sistema de medição de CO de referência

Para a etapa de calibração foi utilizado um sistema de medição que utiliza o princípio eletroquímico (DGS-CO-968-034), sendo capaz de medir concentrações de CO com uma resolução de um décimo de ppm na faixa entre 1 – 99999 ppb. Vantagens em suas especificações, quando comparado ao MQ7, incluem o baixo consumo de energia, a rápida resposta temporal, a compensação da temperatura na medida da concentração, a comunicação digital via protocolo *serial*, tempo de vida estimado em até dez anos e o fato de vir calibrado de fábrica. A Figura 11 apresenta o sistema de referência utilizado durante a calibração do sistema de medição de baixo custo. Consiste em um elemento sensor eletroquímico associado a uma placa eletrônica dedicada à aquisição, tratamento, processamento dos dados relativos à concentração de CO em ppb e comunicação com outros periféricos como computadores ou microcontroladores. É utilizado para aquisições precisas de concentrações de monóxido de carbono, podendo ser utilizado para monitoramento da qualidade do ar. Maiores detalhes acerca das características e funcionamento do deste dispositivo podem ser encontradas no site do fabricante (<http://www.spec-sensors.com>).

Figura 11 - Sistema de referência utilizado para calibração do SMCO.



Fonte: Manual do Produto (SPEC Sensors LLC, 2017, s/p).

O formato de saída e intervalo numérico dos dados do sistema de referência são: NF [XXX], PPB [0 : 999999], TEMP [-99 : 99], UR [0 : 99], SensorDigital, TempDigital, UrDigital, DIA [0 : 99], HORA [0 : 23], MIN [0 : 59] e SEG [0 : 59], onde NF corresponde ao número de fabricação, PPB à concentração de CO em partes por bilhão, TEMP à temperatura, UR à umidade relativa. Os campos SensorDigital, TempDigital e UrDigital estão associados às leituras dos respectivos conversores analógico-digitais. Os campos DIA, HORA, MIN e SEG se referem ao tempo total de operação do sistema de referência contando a partir de seu acionamento.

### 3.4.2 Definição e localização dos pontos de amostragem

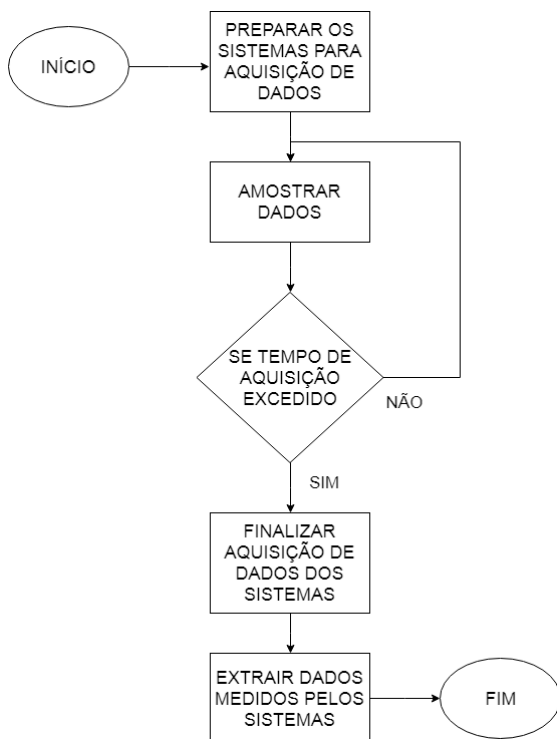
Os testes de campo necessários à efetiva calibração do equipamento foram realizados em ambiente arejado durante 1 dia (14/04/2016) de modo contínuo em Florianópolis. Basicamente os experimentos para a calibração do dispositivo se restringiram a queimar folhas de papel A4 brancas colocadas em recipiente circular de alumínio adequado em diferentes intervalos de tempo, enquanto ambos os sistemas de medição operavam em modo de aquisição contínua. O conjunto de dados amostrados totaliza 401 medições do SMCO e 19620 do sistema de referência aferidos em aproximadamente 6 horas de amostragens. A mangueira de entrada do SMCO foi posicionada a dois centímetros do sistema de referência, estando ambos a uma altura de 1,5 metros do chão. O local selecionado para a realização dos experimentos encontra-se no

bairro Ingleses em uma garagem devidamente ventilada na residência do autor.

### 3.4.3 Amostragem dos dados

A obtenção dos dados de calibração do sistema de referência foi realizada conectando-se este diretamente na porta USB de um laptop e imprimindo as suas saídas no monitor da *serial* a uma taxa de uma amostra por segundo. Os dados foram então copiados e armazenados ao fim de cada experimento. O tempo de preparação do sistema de referência foi de dez horas. Paralelamente, o sistema de medição de baixo custo faz a leitura e armazenamento dos dados no dispositivo de armazenamento a uma taxa de uma amostra por minuto. Ao fim de cada experimento temos dois arquivos de dados: um contendo os dados do sistema de referência e outro contendo os dados adquiridos pelo sistema de baixo custo. Ambos são processados para extração dos dados relevantes a serem utilizados na calibração. Foram realizados um total de 15 experimentos, considerando-se as etapas de calibração e validação do modelo de regressão linear. Cada experimento consiste em realizar-se combustões sucessivas de folhas de papel A4 na cor branca, alocadas no interior de um recipiente circular de alumínio com dimensões apropriadas, enquanto os sistemas estão em modo aquisição de dados. Os tempos totais dos experimentos de calibração e validação são de 327 min e 75 min, respectivamente. A Figura 12 apresenta o fluxograma dos procedimentos realizados durante os experimentos para aquisição dos dados de calibração. No que tange ao sistema desenvolvido, a etapa de extração dos dados consiste em remover o cartão SD presente no protótipo ao final de cada experimento e copiar as informações contidas em seu arquivo de armazenamento utilizando um computador. Já para o sistema de referência, a extração de dados consiste em copiar as informações enviadas ao computador via USB pelo sistema de referência. Assim, ao final de cada experimento tem-se dois arquivos em formato digital contendo parte dos dados utilizados na calibração e validação do protótipo desenvolvido.

Figura 12 - Fluxograma dos procedimentos gerais realizados durante cada experimentação



Fonte: Autoria própria.

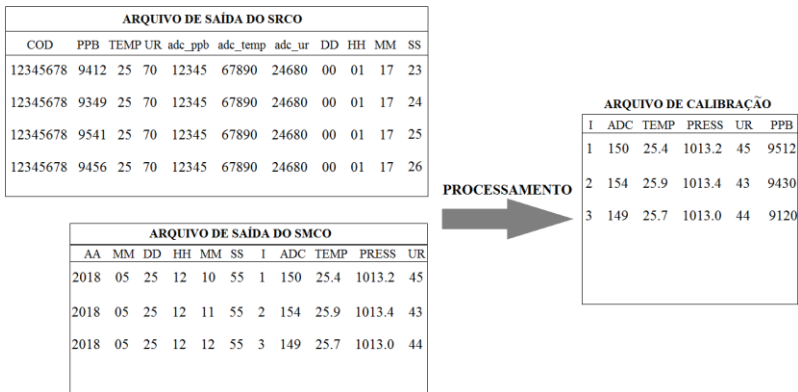
#### 3.4.4 Processamento dos dados

O processamento do arquivo contendo os dados oriundos do sistema de referência consiste em dois estágios: excluir os dados irrelevantes à calibração e ajustar os valores negativos de concentração de CO. Já para o arquivo gerado pelo SMCO, o processamento das informações resume-se a excluir os dados irrelevantes à calibração, deixando apenas os dados relacionados à resposta do sensor de CO, temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa, além de um identificador único de cada medição. A combinação destes dois arquivos processados dá origem ao arquivo contendo os dados de calibração do modelo de regressão linear, como podemos visualizar na Figura 13, onde



I equivale é um número inteiro não-negativo correspondendo ao identificador único da amostra, ADC é um número inteiro não-negativo relacionado à concentração de CO, TEMP é um número real correspondendo à temperatura (em °C), PRESS é um número real, correspondendo à pressão atmosférica (em hPa), UR é um número real não-negativo correspondendo à umidade relativa (em %) e PPB é um número inteiro que corresponde à concentração de CO medida pelo sistema de referência. Cada 60 linhas de dados armazenadas pelo sistema de referência equivalem a uma linha de dados do sistema de baixo custo desenvolvido. O algoritmo de processamento dos dados pode ser encontrado no Apêndice D. A saída do algoritmo é uma matriz numérica contendo os dados utilizados para a determinação dos coeficientes do modelo de regressão linear.

Figura 13 - Obtenção do arquivo de dados utilizado para obtenção do modelo de regressão linear



Fonte: Autoria própria.

3.4.5 Modelo de regressão linear

A saída do SMCO é um valor inteiro relacionado à concentração do poluente que representa a concentração (em ppm) medida pelo sensor MOS. Em via de regra, este valor não está devidamente calibrado. Esta tarefa pode ser realizada através de modelos matemáticos que relacionem a resposta do sensor e as variáveis atmosféricas às respectivas concentrações.

Modelo de regressão linear de primeira ordem

A concentração estimada de CO (em ppm), obtida unicamente em função da resposta do sensor semicondutor, pode ter a forma polinomial

$$Y = A + B.X + \varepsilon \quad (7)$$

onde A e B são coeficientes reais constantes a serem determinados  
 Y é o logaritmo da concentração de CO (em ppm) estimado  
 X é o logaritmo de  $1023/ADC-1$ , com ADC igual a saída do conversor analógico-digital conectado ao sensor semicondutor de óxidos metálicos (valor inteiro entre 0 e 1023)  
 $\varepsilon$  é o erro associado às estimativas do modelo (ppm)

O modelo proposto pode ser determinado caso as variáveis de entrada e saída sigam distribuições normais de probabilidade e que o erro das estimativas seja uma distribuição normal com média nula. Os coeficientes presentes na Equação 7 são estimados utilizando-se a ferramenta *cftool* do MATLAB.

### 3.4.6 Verificação da Qualidade do Ajuste dos modelos

Após a determinação dos coeficientes do modelo de regressão linear, é necessário avaliar o grau de ajuste do modelo aos dados experimentais de validação. Considerar-se-á o modelo adequado caso este estime a concentração de monóxido de carbono com pequeno erro residual.

Nesse sentido, métodos visuais podem ser utilizados, como a plotagem dos erros residuais entre as estimativas do modelo e os respectivos valores de referência. Porém, o cálculo de parâmetros estatísticos quantitativos e intervalos de confiança são indicadores numéricos que apoiam o raciocínio estatístico. Basicamente, o método numérico tenta traduzir o grau de similaridade entre os dados de referência e a estimativa dos modelos na forma de um único valor numérico. Os parâmetros estatísticos utilizados na definição da qualidade do ajuste dos modelos são:

- I. Coeficiente de determinação ( $R^2$ )
- II. Raiz Quadrada da média dos erros residuais quadráticos (RMSE)
- III. Média aritmética dos erros residuais (bias)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 EXPERIMENTOS E A VERIFICAÇÃO DA NORMALIDADE DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR

Foram realizados 12 experimentos para a obtenção dos dados para obtenção do modelo de regressão linear. A verificação da normalidade das variáveis de entrada e saída faz-se necessária como pré-requisito à proposição do modelo. O Apêndice D apresenta os resultados obtidos durante a amostragem dos dados de ambos os sistemas de medição. Um total de 316 minutos de medições foram efetuadas durante os experimentos e o conjunto de dados, em escala dilog, é apresentado na Figura 14 juntamente com os gráficos de probabilidade das variáveis dependente e independente. Pode-se verificar que as variáveis envolvidas seguem uma distribuição normal de probabilidades permitindo, assim, que um modelo de regressão linear seja proposto e determinado.

Figura 14 – Dados experimentais e verificação da normalidade das variáveis. Gráfico log-log dos dados experimentais e curvas de densidade e probabilidade utilizadas para verificação visual da normalidade das variáveis de entrada e saída: Figuras A, B e C.  $Y_n$  é o logaritmo da concentração de monóxido de carbono normalizado.  $X_n$  equivale ao logaritmo de  $1023/ADC-1$  normalizado, onde ADC é a resposta do sensor MOS.

A)

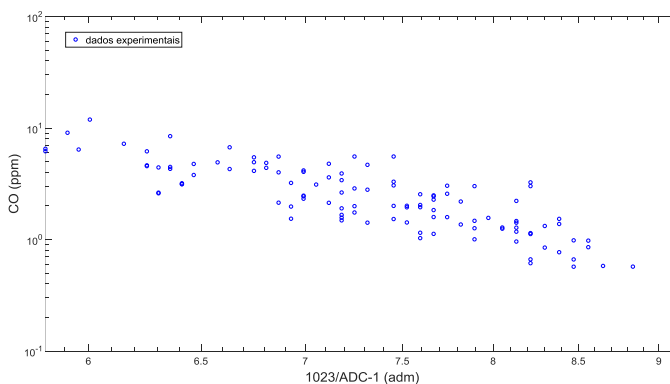


Figura 14: (continuação) – Dados experimentais e verificação da normalidade das variáveis de entrada e saída: Figura B.

B)

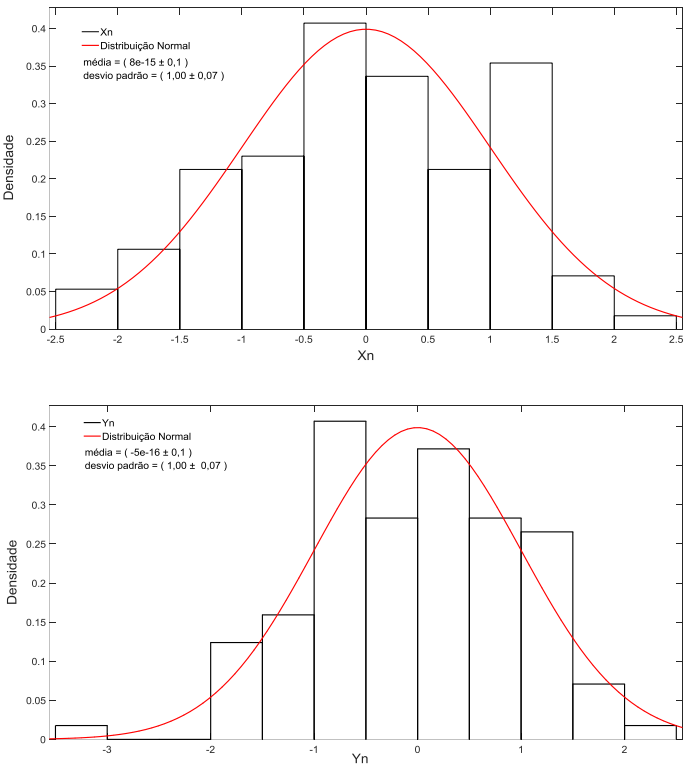
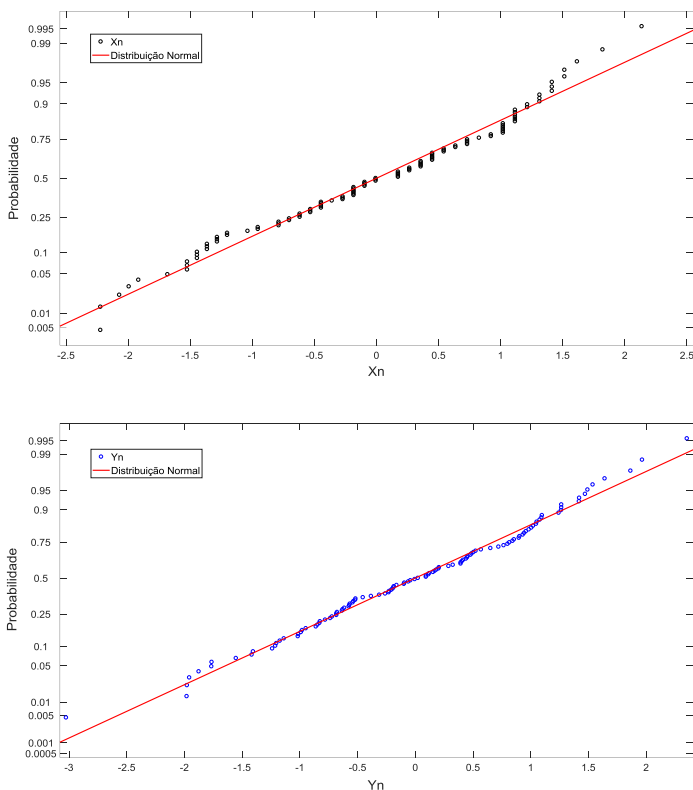


Figura 14: (continuação) – Dados experimentais e verificação da normalidade das variáveis de entrada e saída: Figura C.  
C)



Fonte: Autoria própria.

Testes de hipóteses paramétricos de Jarque-Bera, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk foram realizados utilizando o MATLAB e as hipóteses de normalidade dos dados de entrada  $X_n$  e saída  $Y_n$  não foram rejeitadas em nenhum dos testes citados, como podemos verificar na Tabela 1. Todos os valores das estatísticas são inferiores aos críticos aceitáveis para um nível de significância de 5%. Ambas as variáveis analisadas possuem baixa assimetria para a esquerda. Em se tratando da curtose, a variável de saída possui valor mais próximo do 3 indicando um comportamento mais normal se comparado à variável de entrada.

Tabela 1 - Testes de normalidade da entrada e saída do modelo de regressão linear

Testes de normalidade, assimetria e curtose						
Variável	Testes					
	Jarque-Bera			Kolmogorov-Smirnov		
	P <sup>a</sup>	JB <sup>b</sup>	CV <sup>c</sup>	P	KS <sup>d</sup>	CV
Xn	0,114	3,49	5,49	0,665	0,0670	0,126
Yn	0,500	1,13	5,49	0,888	0,0533	0,126

Variável	Teste			
	Shapiro-Wilk			
	P	SW <sup>e</sup>	Assimetria	Curtose
Xn	0,0622	0,978	-0,256	2,31
Yn	0,667	0,991	-0,221	2,79

<sup>a</sup> Valor p com alfa=5%.

<sup>b</sup> Estatística de Jarque-Bera

<sup>c</sup> Valor crítico da estatística

<sup>d</sup> Estatística de Kolmogorov-Smirnov

<sup>e</sup> Estatística de Shapiro-Wilk

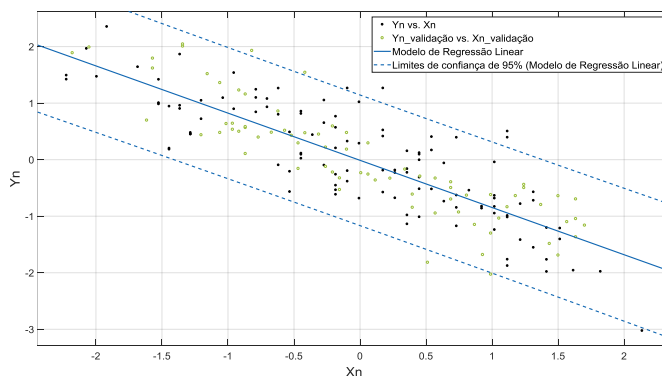
Fonte: Autoria própria.

4.2 MODELO DE REGRESSÃO LINEAR

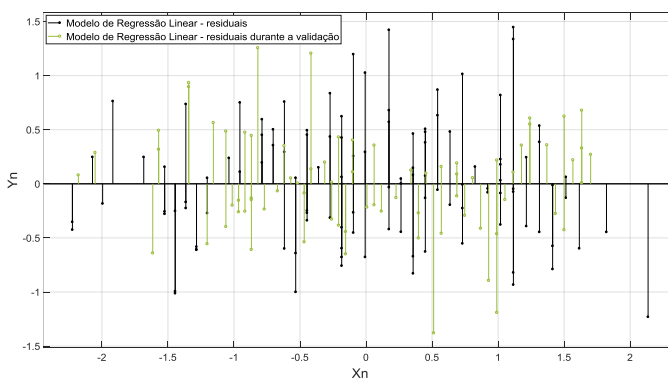
O modelo de regressão linear obtido e seus respectivos erros residuais são apresentados na Figura 15. Foram utilizados 113 pontos para a determinação dos coeficientes do modelo e 75 pontos na validação. Pode-se perceber um bom ajuste do modelo aos dados experimentais e é possível verificar que os erros residuais se encontram espalhados em torno do valor nulo.

Figura 15 - Modelo de regressão linear e erros residuais dos dados experimentais e de validação: Figuras A e B

A)



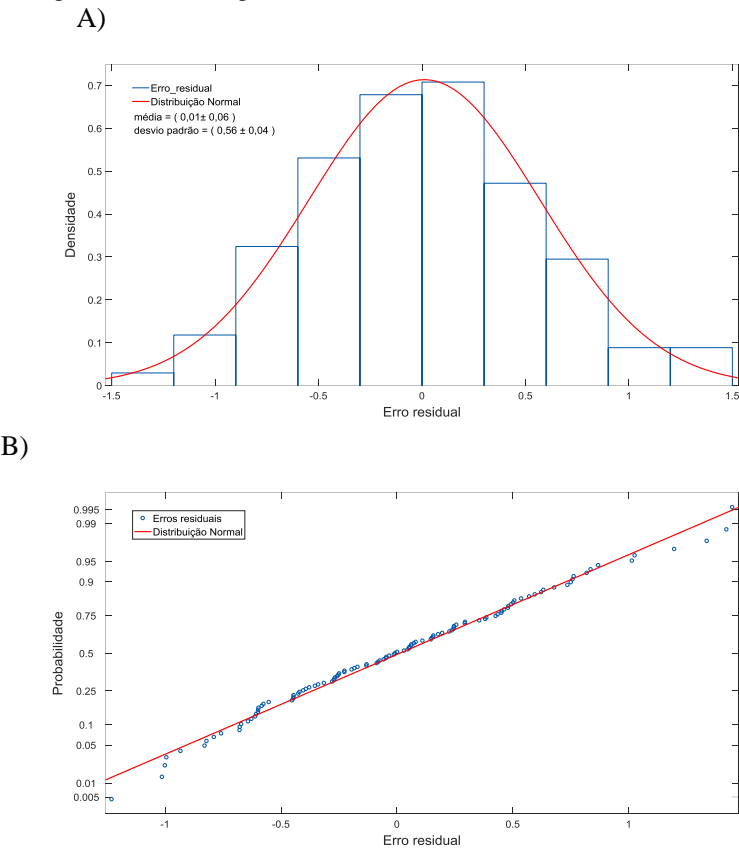
B)



Fonte: Autoria própria.

A Figura 16 apresenta gráficos de densidade e probabilidade dos erros residuais do modelo de regressão linear, onde é possível se verificar visualmente que os residuais seguem uma distribuição aproximadamente normal com média nula, que é um dos requisitos para a utilização de modelos de regressão linear.

Figura 16 - Gráficos de densidade e probabilidade do erro residual do modelo de regressão linear: Figuras A e B.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes de normalidade do erro residual, além de sua assimetria e curtose. Pode-se verificar que a hipótese da normalidade dos resíduos foi aceita em todos os testes realizados.



Tabela 2 - Testes da normalidade do erro residual do modelo de regressão linear

<b>Testes de normalidade, assimetria e curtose do erro residual do modelo de regressão linear</b>						
<b>Variável</b>	<b>Testes</b>					
	Jarque-Bera			Kolmogorov-Smirnov <sup>f</sup>		
	<b>P<sup>a</sup></b>	<b>JB<sup>b</sup></b>	<b>CV<sup>c</sup></b>	<b>P</b>	<b>KS<sup>d</sup></b>	<b>CV</b>
<b>Erro Residual</b>	0,349	1,70	5,49	0,970	0,0447	0,126

<b>Variável</b>	<b>Teste</b>			
	Shapiro-Wilk			
	<b>P</b>	<b>SW<sup>e</sup></b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
<b>Erro Residual</b>	0,524	0,989	0,274	2,76

<sup>a</sup> Valor p com alfa=5%.      <sup>c</sup> Valor crítico da estatística

<sup>b</sup> Estatística de Jarque-Bera      <sup>d</sup> Estatística de Kolmogorov-Smirnov

<sup>e</sup> Estatística de Shapiro-Wilk      <sup>f</sup> Erro residual normalizado

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros do modelo de regressão linear e a qualidade do seu ajuste aos dados experimentais e de validação são apresentados na Tabela 3, onde pode-se verificar que o modelo de regressão obtido conseguiu explicar 67,6% da proporção da variação dos dados experimentais ( $R^2$ ), apresentando pequenos erro médio quadrático (RMSE) e média residual (BIAS). O erro médio quadrático associado aos dados de validação diminuiu, indicando que o modelo obtido pode ser devidamente utilizado para estimativas da concentração de monóxido de carbono.

Tabela 3 - Modelo de regressão linear: coeficientes da curva, qualidade do ajuste e parâmetros da distribuição de probabilidade do erro residual.

PARÂMETROS E QUALIDADE DO AJUSTE DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR				
MODELO DE REGRESSÃO LINEAR:			Y <sub>n</sub> = A.X <sub>n</sub> + B	
Coeficientes estimados <sup>a</sup> :				
		Erro padrão	Estatística t	Valor P
A	-0,83 (-0,89; -0,77)	0,06	-15,22	6,10e-29
B	-0,01 (-0,07; 0,05)	0,06	-0,21	0,834
Qualidade do ajuste:				
		R <sup>2</sup>	RMSE	BIAS
		67,6 %	0,58	0,012
Validação:				
		-	0,48	-

<sup>a</sup> Com nível de confiança de 95%.

Fonte: Autoria própria.

#### 4.3 VERIFICAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO DE REGRESSÃO LINEAR E AS VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS

A verificação da influência das variáveis atmosféricas sobre a variável de saída foi realizada através do coeficiente de correlação linear de Pearson, como apresentado na Tabela 4. Pode-se verificar que: existe uma boa correlação entre as variáveis de entrada X e saída Y; baixa correlação entre a entrada X e a temperatura e umidade; baixa correlação entre a saída Y e a umidade e, por fim, alta correlação entre a temperatura e a pressão e umidade. Dessa maneira, fica evidenciado que não existe a necessidade de se proceder com algum tipo de compensação na saída do modelo de regressão linear devido à influência das variáveis atmosféricas.

Tabela 4 - Correlação linear entre os dados experimentais<sup>a</sup>.

COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON			
Variáveis		Coeficientes	
		ρ	P
Xn	Yn	-0,829	8,25e-30
T	P	-0,591	5,50e-12
T	U	-0,867	2,21-35
P	U	0,307	9,42e-4

<sup>a</sup> com nível de significância de 5%. X<sub>n</sub> (adm), T (°C), P (hPa), U (%) e Y<sub>n</sub> (adm) estão relacionados, respectivamente, a resposta do sensor MOS, temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa e concentração de CO medida pelo sistema de referência.

Fonte: Autoria própria.

4.4 EQUAÇÃO DE TRANSDUÇÃO DO SENSOR MOS

A equação de transdução do sensor MOS foi obtida a partir do modelo de regressão linear dado por

$$Y_n = A.X_n + B = -0,83.X_n - 0,01 \tag{8}$$

onde Y<sub>n</sub> é um admensional igual a (Y – 0,3574) / 0,3045  
X<sub>n</sub> é um admensional igual a (X – 0,8646) / 0,0448  
Y equivale ao logaritmo da concentração estimada pelo modelo (ppm)  
X equivale ao logaritmo de 1023/ADC-1, com ADC correspondendo à resposta do sensor MOS (adm)  
A e B são, respectivamente, os coeficientes angular e linear do modelo (adm)

que pode ser reescrita como

$$Y \cong 5,256 - 5,670.X \tag{9}$$

onde o coeficiente linear é dado por (5,256 ± 0,639 ppm) e o coeficiente angular por (-5,670 ± 0,738 ppm).

A concentração de monóxido de carbono estimada pelo modelo em função da resposta do sensor MOS é dada por

$$CO = 10^B \cdot (1023/ADC - 1)^A \cong 10^{5,256} \cdot (1023/ADC - 1)^{-5,670} \quad (10)$$

onde CO equivale à concentração de monóxido de carbono estimada pelo modelo (ppm)

que pode ser reescrita em função da resistência do sensor MOS como

$$CO \cong 10^{5,256} \cdot (R_s/R_L)^{-5,670} \cong 8,63 \cdot 10^{27} \cdot R_s^{-5,670} \quad (11)$$

onde  $R_s$  equivale à resistência elétrica do sensor MOS ( $\Omega$ )

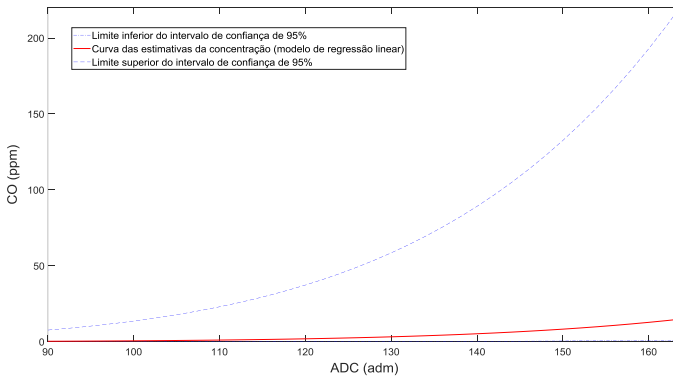
$R_L$  equivale à resistência elétrica de carga (10 k $\Omega$ ) utilizada no divisor de tensão da placa eletrônica que contém o sensor MOS

Portanto, a equação de transdução do sensor MOS é dada por

$$R_s \cong 84525 \cdot CO^{-0,1764} \quad (12)$$

A Figura 17 mostra a Equação 10 e seu respectivo intervalo de confiança. Nela é possível se estimar a concentração de monóxido de carbono em ppm a partir da saída do conversor analógico conectado ao sensor semicondutor de óxidos metálicos.

Figura 17 - Curva exponencial das estimativas do modelo de regressão linear



Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de um sistema de medição portátil e de baixo custo, denominado SMCO-LCQAr, sendo este capaz de quantificar concentrações de monóxido de carbono (em ppm) com certa confiabilidade dentro do intervalo de medição a que foi concebido. O sistema foi projetado em ambiente computacional utilizando ferramentas CAE/CAD/CAM e posteriormente foi construído um protótipo físico operacional a partir de técnicas como a impressão 3d de algumas peças constituintes, a programação da lógica computacional no microcontrolador e as interconexões elétricas do SMCO.

A calibração do SMCO resultou na obtenção de um modelo que melhor relaciona a concentração medida pelo sistema de referência com as medições do sensor semicondutor presente no protótipo desenvolvido. O conjunto de dados de calibração não conseguiu abranger experimentalmente a faixa de concentrações regulamentadas na CONAMA 03 (35ppm p/médias 8h e 9ppm p/ médias horárias) durante os experimentos, de modo que é recomendada a realização de novos experimentos que proporcionem uma maior base de dados e concentrações mais elevadas do poluente, condição esta que só pode ser garantida em ambiente laboratorial utilizando gases padronizados, sistemas de diluição e, preferencialmente, condições de temperatura e umidade controladas, mesmo não sendo possível rejeitar a hipótese de não-correlação entre o sinal do sensor e nenhuma das variáveis atmosféricas. O sistema de referência utilizado mostrou-se bastante sensível durante os experimentos, apresentando considerável oscilação em baixas concentrações (décimos de ppm).

A incerteza nas medições foi alta, mas ainda assim os dados podem ser utilizados se a qualidade destes for um requisito menos importante. Assim sendo, o protótipo desenvolvido pode ser utilizado satisfatoriamente na detecção de níveis do poluente, além de plataforma de aprendizagem acadêmica e estímulo ao desenvolvimento da ciência, engenharia e matemática aplicadas na área da qualidade do ar.

Algumas questões relacionadas a estimativa do SMCO merecem maiores análises, como por exemplo: se o sentido do fluxo gasoso em relação a superfície do sensor altera as estimativas; se a variação da vazão utilizada durante os experimentos tem influência nas estimativas; se o controle da temperatura do sensor MQ7 pode otimizar a sensibilidade e estabilidade do equipamento; se a estimativa varia em função do tempo de operação; se a presença de gases interferentes tiveram alguma influência sobre os resultados obtidos.



## REFERÊNCIAS

AL BARAKEH, Zaher et al. Development of a normalized multi-sensors system for low cost on-line atmospheric pollution detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 241, p. 1235-1243, 2017.

ALEIXANDRE, M., & GERBOLES, M. (2012). Review of Small Commercial Sensors for Indicative Monitoring of Ambient Gas. 30, 169-174. Madrid, Spain: The Italian Association of Chemical Engineering.

BARD, Allen J. **Electrochemical methods: fundamentals and applications**. New York: wiley, 1980.

CASTELL, Nuria et al. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?. *Environment international*, v. 99, p. 293-302, 2017.

CONAMA 01. Ministério do Meio Ambiente. Resolução de 23 de janeiro de 1986. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acesso em: 29 de agost. 2017.

FIGARO USA, INC. MOS & EC type: Operating principle. North America, 2016. Disponível em: < <http://www.figarosensor.com/technicalinfo/principle/mos-type.html>>. Acesso em: 30 fev. 2018

FRONDIZI, CARLOS ALBERTO. **Monitoramento da qualidade do ar: teoria e prática**. Editora E-papers, 2008.

KOROTCENKOV, G. Handbook of Gas Sensor Materials: Properties, Advantages and Shortcomings for Applications Volume 2: New Trends and Technologies, Vol. 2. 2014.

KUMAR, Prashant. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. **Environment international**, v. 75, p. 199-205, 2015.

LEWIS, Alastair; EDWARDS, Peter. **Validate personal air-pollution sensors**. *Nature*, v. 535, n. 7610, p. 29-32, 2016.

MATHWORKS. Goodness-of-fit. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

MEAD, Mohammed Iqbal et al. The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, v. 70, p. 186-203, 2013.

MIKOŁAJCZYK, Janusz. Detection of gaseous compounds with different techniques. *Metrology and Measurement Systems*, v. 23, n. 2, p. 205-224, 2016.

PIEDRAHITA, Ricardo et al. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 7, n. 10, p. 3325, 2014.

RADA, E. C., Ragazzi, M., Brini, M., Marmo, L., Zambelli, P., Chelodi, M., & Ciolli, M. (2012). Perspectives of low-cost sensors adoption for air quality monitoring. *SCI Bull*, 74, 1454-2358.

SPEC Sensors LLC. Digital Gas Sensor – Carbon Monoxide, 2017. Disponível em: <<https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-CO-968-034.pdf>>. Acessado em: 07 jun. 2018.

SPINELLE, Laurent et al. Calibration of a cluster of low-cost sensors for the measurement of air pollution in ambient air. In: *SENSORS*, 2014 IEEE. IEEE, 2014. p. 21-24.

SURIANO, D., Prato, M., Cassano, G., & Penza, M. (2014). Air - Sensor box for air quality control measurements. Brindisi, Italy: ENEA.

US-EPA. Quantitative Risk and Exposure Assessment for Carbon Monoxide, 2010. Disponível em: <<http://www.epa.gov/naaqs/carbon-monoxide-co-air-quality-standards>>. Acessado em: 07 jun. 2018.



## APÊNDICE A – Lista de Materiais e Orçamento do SMCO

Planilha 1 – Orçamento do SMCO. Data da elaboração: 07/02/2018

COMPONENTE	Nº DE PEÇAS	CUSTO UNITÁRIO (R\$)	FRETE (R\$)	TOTAL (R\$)	
Arduino Nano	1	18,00	15,90	33,90	585,5
Sensor MQ7	1	19,90	8,90	28,80	
Sensor BMP280	1	8,99	14,90	23,89	
Sensor DHT11	1	4,99	9,90	14,89	
Bateria LIR2032	1	9,99	9,90	19,89	
Módulo RTC1307	1	9,90	9,90	19,80	
Módulo SD	1	8,00	19,00	27,00	
SDCard 2GB	1	9,90	14,90	24,80	
Módulo LCD 16x4	1	34,90	18,90	53,80	
Adaptador LCD IIC	1	5,50	9,90	15,40	
Buzzer	1	4,99	12,00	16,99	
Transistor Mosfet	1	4,45	16,90	21,35	
Regulador 7806	1	7,90	17,90	25,80	
Chave 2 posições	2	3,79	16,90	24,48	
Botão	1	6,95	20,90	27,85	
Driver LM298	1	13,90	17,90	31,80	
Sensor MQ7	1	19,90	8,90	28,80	
Ventoinha	2	34,50	9,90	78,92	
Fonte 12V-2A	1	8,99	9,90	18,89	
Matriz de contatos	3	6,80	18,90	39,30	
Fios	3	6,99	17,00	37,97	
Tubulação PVC (16mm)	1	24,90	0	24,90	212,9
Mangueira flexível (10mm)	2	5,00	0	10,00	
Caixa protetora	1	33,00	0	33,00	
Peças Suporte 3D	9	15,00	0	135,00	
Parafuso	1	10,00	0	10,00	
				Σ =	798,4

Fonte: Autoria própria.

## APÊNDICE B – Algoritmo de controle do SMCO

```

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#include <BMP280.h>
#include <dht.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "RTCLib.h"

// SD card attached to SPI bus as follows:
// MOSI - pin 11
// MISO - pin 12
// CLK - pin 13
// CS - pin 4
// SD card pins
// pins A4 and A5 (SDA and SCL) are used for I2C communication
// used for SDcard
#define CS_PIN 4
// driver fun pins
#define IN1_PIN 5 // pwm pin
#define IN2_PIN 7
#define IN3_PIN 6 // pwm pin
#define IN4_PIN 8
// analog sensor pin
#define MQ7_PIN A0
// digital mosfet sensor pin
#define MOSFET_MQ7_PIN 17 //analog A3 as digital
// buttons mode and start pins
#define BUTTON_MODE_PIN 10
#define BUTTON_START_PIN 16 //analog A2 as digital
// buzzer pin -> activated LOW
#define BUZZER_PIN 9
// humidity sensor analog pin
#define DHT11_PIN A1

// global static variables
#define SETUP_TIME 120 // time in seconds
// time in seconds. obs: used if not continuous mode acquisition
// #define ACQUISITION_TIME 120
#define SAMPLE_TIME 60 // time in seconds

```

```

// number of blinks in the end of modes
#define NUMBER_BLINKS 5
// set the LCD address to 0x27 for a 20 chars 4 line display
// Set the pins on the I2C chip used for LCD connections:
// addr, en,rw,rs,d4,d5,d6,d7,bl,blpol
// Set the LCD I2C address
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
BMP280 bmp; // pressure and temperature sensor
dht DHT; // humidity sensor
int button_mode; // used to button to choose the mode operation
int button_start; // used to button to start the system
// temperature and pressure and humidity holding variables
double T,P,H;
File myFile; // file used to stored measures values
RTC_DS1307 rtc; // real time clock

```

```

void measureTPH(){
    // measure temperature and pressure from BMP280P
    char result = bmp.startMeasurment();
    if(result!=0){
        delay(result);
        result = bmp.getTemperatureAndPressure(T,P);
    }
    else { Serial.println("Error in BMP280P."); }
    // end of measures of temperature and pressure from BMP280
    // read humidity from dht11 sensor
    int chk = DHT.read11(DHT11_PIN);
    H = DHT.humidity;
}

```

```

void waitCommand(){
    lcd.setCursor(0,0); lcd.print(" SISTEMA MEDICAO CO ");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("T:");lcd.print(T,1);
    lcd.print((char)223); lcd.print("C"); lcd.setCursor(9,1);
    lcd.print("P:"); lcd.print(P,1); lcd.print("hPa"); lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("H:"); lcd.print(H,1); lcd.print("%"); lcd.setCursor(9,2);
    if(digitalRead(MOSFET_MQ7_PIN)){
        lcd.print("MQ7 : on");} else{lcd.print("MQ7 : off");
    }
    lcd.setCursor(0,3); lcd.print("aguardando comando...");
}

```

```

void setup() {

```

```

// pins definition
pinMode(IN1_PIN,OUTPUT);
pinMode(IN2_PIN,OUTPUT);
pinMode(IN3_PIN,OUTPUT);
pinMode(IN4_PIN,OUTPUT);
pinMode(MOSFET_MQ7_PIN,OUTPUT);
pinMode(BUTTON_MODE_PIN,INPUT_PULLUP);
pinMode(BUTTON_START_PIN,INPUT_PULLUP);
pinMode(CS_PIN,OUTPUT);
pinMode(BUZZER_PIN,OUTPUT);
// pins initialization
analogWrite(IN1_PIN,0);
digitalWrite(IN2_PIN,LOW);
analogWrite(IN3_PIN,0);
digitalWrite(IN4_PIN,LOW);
digitalWrite(MOSFET_MQ7_PIN,LOW);
digitalWrite(BUZZER_PIN,HIGH); // deactivated

// serial communication initialization
Serial.begin(9600);
// BMP verification of initialization
if(!bmp.begin()){
  Serial.println("BMP init failed!");
  //while(1);
}
else Serial.println("BMP init success!");
bmp.setOversampling(4);
// initialize SC card
Serial.print("Initializing SD card...");
if (!SD.begin(CS_PIN)) {
  Serial.println("SD card initialization failed!");
  activateBuzzer(1000,1000,5);
  return;
}else{ Serial.println("SD card initialization done."); }
// initialize RTC
if (!rtc.begin()) {
  Serial.println("Couldn't find RTC");
  while (1);
}
// testar se RTC está funcionando
if (rtc.isrunning()) {
  Serial.println("RTC is running!");
}else{ Serial.println("RTC is NOT running!");

```

//following line sets the RTC to the date & time this sketch was compiled

```
// rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
// This line sets the RTC with an explicit date & time
// January 21, 2014 at 3am you would call:
// rtc.adjust(DateTime(2018, 4, 16, 14, 00, 00));
}
```

// initialize LCD

```
lcd.begin(20,4); // initialize the lcd for 20 chars 4 lines
```

```
lcd.backlight(); // turn on backlight
```

```
Serial.println("Sistema iniciado.");
```

```
delay(1000);
```

```
lcd.setCursor(0,0);
```

```
lcd.print(" SISTEMA MEDICAO CO ");
```

```
lcd.setCursor(0,3); // terceira linha do LCD
```

```
lcd.print("aguardando comando..");
```

```
activateBuzzer(50,50,5); // 2 seconds -> 5*(200+200)ms
```

aproximatelly

```
}
```

**void loop() {**

```
// measure temperature, pressure and humidity
```

```
measureTPH();
```

```
// do another things right here if exist something on serial
```

```
if(Serial.available()>0){
```

```
    // for testing and debug or send commands or change parameters
```

```
    ;
```

```
}else{
```

```
    // start of operation...verify button's states
```

```
    button_mode = digitalRead(BUTTON_MODE_PIN);
```

```
    button_start = digitalRead(BUTTON_START_PIN);
```

```
    // mode SETUP
```

```
    // if button mode down position -> mode setup
```

```
    if(button_mode && !button_start){
```

```
        // initialize setup mode
```

```
        modeSetup();
```

```
    }
```

```
    // if button mode down position -> mode setup
```

```
    if(!button_mode && !button_start){
```

```
        // if button mode up position -> mode acquisition
```

```
        // initialize acquisition mode
```

```
        modeAcquisition();
```

```
    }
```

```

state      // actualize display information with sensors values and system
            waitCommand();
        }
        delay(500);
    }

```

```

void activateBuzzer(int time_on,int time_off,int rep){
    for(int k=0;k<rep;k++){ // for 2 seconds
        // send sonoral signal
        // activated
        digitalWrite(BUZZER_PIN,LOW); delay(time_on);
        // deactivated
        digitalWrite(BUZZER_PIN,HIGH); delay(time_off);
    }
}

```

```

void modeSetup(){
    // bip buzzer
    activateBuzzer(100,100,2); // 2 seconds -> 5*(200+200)ms
    // used for statistics for time of conclusion at setup mode
    double conclusion = 0;
    // turn on sensor MQ7 via transistor
    digitalWrite(MOSFET_MQ7_PIN,HIGH);
    // turn on fun2 on medium velocity
    // pwn signal(0-255 map 0-12Volts on fun )
    analogWrite(IN3_PIN,200); // wait a time for turn on fun 2
    lcd.clear();
    // repeat until de setup time (in seconds) ends
    for(int i=1;i<=SETUP_TIME;i++){
        delay(1000);
        conclusion = (double)i*100/(double)SETUP_TIME;
        // actualize display //////////////////////////////////
        // lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print(" SISTEMA MEDICAO CO ");
        lcd.setCursor(0,1);
        if(digitalRead(MOSFET_MQ7_PIN)){
            lcd.print("MQ7 : on");
        }else{lcd.print("MQ7 : off");}
        lcd.setCursor(0,2);
        lcd.print(conclusion);
        lcd.print(" %");
    }
}

```

```

    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("efetuando setup...");
}
// turn off fun2
analogWrite(IN3_PIN,0);
// atualize display
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(" SISTEMA MEDICAO CO ");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("SETUP completo.");
// bip buzzer
activateBuzzer(100,100,4); // 0.8 seconds -> 4*(100+100)ms
// flash display
for(int j=0;j<NUMBER_BLINKS;j++){
    lcd.noBacklight();
    delay(200);
    lcd.backlight();
    delay(1800);
}
lcd.clear();
}

```

// Ler sensor de CO a cada 10 segundos por 60 segundos  
// e apresentar valor maximo e media

```

void modeAcquisition(){
    // activate buzzer
    activateBuzzer(50,50,2); // 0.2 seconds -> 2*(50+50)ms
    // turn on sensor
    digitalWrite(MOSFET_MQ7_PIN,HIGH);
    // turn on fun1 on max velocity
    analogWrite(IN1_PIN,255);
    // turn on fun2 on max velocity
    analogWrite(IN3_PIN,255);
    // maximum value and mean of CO sensor
    // used in acquisition mode to show number of samples
    unsigned long count = 0;
    int value;
    // atualize display informations
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" SISTEMA MEDICAO CO ");
}

```

```

lcd.setCursor(0,1);
if(digitalRead(MOSFET_MQ7_PIN)){
  lcd.print("MQ7 : on");
}else{lcd.print("MQ7 : off");}
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("obtendo dados...");
// acquisition of data until the mode setup button is choiced
// while button mode on acquisition mode
while (!digitalRead(BUTTON_MODE_PIN)){
  count++; // increment counter of iterations
  // measure's time
  DateTime now = rtc.now();
  // read analog value from sensor
  value = analogRead(MQ7_PIN);
  // atualiza temperatura, pressure and humidity values
  measureTPH();
  // put analog value read in file on SDCard if it exists
  Serial.println("Escrevendo dado no arquivo...");
  myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  myFile.print(String(count));myFile.print("\t");
  myFile.print(String(value));
  // put temperature, pressure and humidity to SDCard
  myFile.print("\t"); myFile.print(String(T,1));
  myFile.print("\t"); myFile.print(String(P,1));
  myFile.print("\t"); myFile.print(String(H,0));
  // put data and time to measure in SDCard
  myFile.print("\t"); myFile.print(String(now.year(),DEC));
  myFile.print("/"); myFile.print(String(now.month(),DEC));
  myFile.print("/"); myFile.print(String(now.day(),DEC));
  myFile.print("\t");myFile.print(String(now.hour(),DEC));
  myFile.print(":"); myFile.print(String(now.minute(),DEC));
  myFile.print(":"); myFile.println(String(now.second(),DEC));
  myFile.close();
  // most important delay! SDcard is writing data just right now
  delay(1000);
  Serial.println("Dado (1 amostra) escrito com sucesso!");
  // atualize counter of samples on the LCD
  lcd.setCursor(0,3); lcd.print("AMOSTRA : "); lcd.print(count);
  // bip indicating end of one system measures
  activateBuzzer(50,50,1); // 0.1 seconds -> 1*(50+50)ms
  // wait for the rest time (total time = sample time)
  for(int i=1;i<SAMPLE_TIME;i++){
    delay(1000); // sample time interval }

```



```

    }
    // turn off funs 1 and 2
    analogWrite(IN1_PIN,0); analogWrite(IN3_PIN,0);
    // clear and actualize display
    lcd.clear(); lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" SISTEMA MEDICAO CO ");
    lcd.setCursor(0,1);
    if(digitalRead(MOSFET_MQ7_PIN)){ lcd.print("MQ7 : on");
    }else{lcd.print("MQ7 : off");}
    lcd.setCursor(0,3); lcd.print("Aquisicao finalizada");
    // bip buzzer
    activateBuzzer(50,50,5); // 0.5 seconds -> 5*(50+50)ms
    // flash display
    for(int j=0;j<NUMBER_BLINKS;j++){
        lcd.noBacklight(); delay(250); lcd.backlight(); delay(1250); }
    // show initial screen
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" SISTEMA MEDICAO CO ");
    lcd.setCursor(0,3); // terceira linha do LCD
    lcd.print("aguardando comando..");
}
}

```

## APÊNDICE C – Algoritmo de Processamento dos Dados

```

function M = preProcess(inputCSVFileREF, inputCSVFileSMCO,
meanSamples)
%% pre-process SMCO csv file
M_SMCO = csvread(inputCSVFileSMCO);
%% discovery size of SMCO data file
[numberSamples numberVariables] = size(M_SMCO);
%% remove unusable columns (1 -> id, 3 -> T,4 -> UR, %% 5,6,7
analog readings)
M_SMCO = M_SMCO(:,2:5);
%% open csv file from DGS (reference system)
M = csvread(inputCSVFileREF);
%% remove unusable columns (1 -> id, 3 -> T,4 -> UR, %% 5,6,7
analog readings)
M(:,1) = [];
M(:,2:6) = [];
%% discovery size of DGS data file
[m n] = size(M);
% calculate length of block samples
blockSize = fix(m/numberSamples);
M_aux = M;
%% remove data anomalies from DGS
for i=1:m
    % column 1 is COppb value after remove columns
    if M_aux(i,1)<0
        M_aux(i,1)=0;
    end
end
M = [];
% calculate means
[lines columns] = size(M_aux);
if numberSamples*blockSize <= lines
    for k=1:numberSamples
        LI = k*blockSize-meanSamples+1;
        LS = k*blockSize;
        %important line -> COppb median
        medianValue = median(M_aux(LI:LS,1));
        M = [M ; medianValue];
    end
else
    disp('Nao deu pra calcular!');
end
%% join data

```

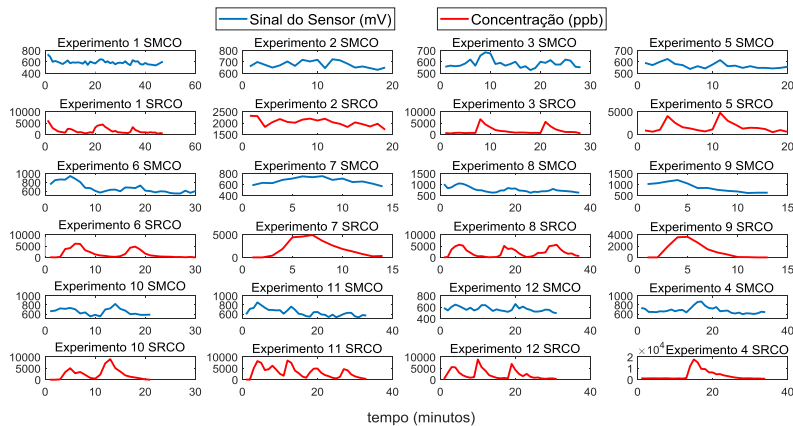
```

M = [M_SMCO M];
end % end of function
##### Script de comando #####
%% number of sample to calculate median
meanSamples = 60;
%% process and join data
M_preProcess_teste1 = preProcess('calibracao_teste1.csv',
'calibracao_smco_teste1.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste2 = preProcess('calibracao_teste2.csv',
'calibracao_smco_teste2.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste3 = preProcess('calibracao_teste3.csv',
'calibracao_smco_teste3.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste4 = preProcess('calibracao_teste4.csv',
'calibracao_smco_teste4.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste5 = preProcess('calibracao_teste5.csv',
'calibracao_smco_teste5.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste6 = preProcess('calibracao_teste6.csv',
'calibracao_smco_teste6.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste7 = preProcess('calibracao_teste7.csv',
'calibracao_smco_teste7.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste8 = preProcess('calibracao_teste8.csv',
'calibracao_smco_teste8.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste9 = preProcess('calibracao_teste9.csv',
'calibracao_smco_teste9.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste10 = preProcess('calibracao_teste10.csv',
'calibracao_smco_teste10.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste11 = preProcess('calibracao_teste11.csv',
'calibracao_smco_teste11.csv',meanSamples);
M_preProcess_teste12 = preProcess('calibracao_teste12.csv',
'calibracao_smco_teste12.csv',meanSamples);
%% join data
M_preProcess = M_preProcess_teste1;
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste2];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste3];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste4];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste5];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste6];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste7];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste8];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste9];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste10];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste11];
M_preProcess = [M_preProcess ; M_preProcess_teste12];
%% convert DGS values to ppm
M_preProcess(:,5) = 0.001*M_preProcess(:,5);

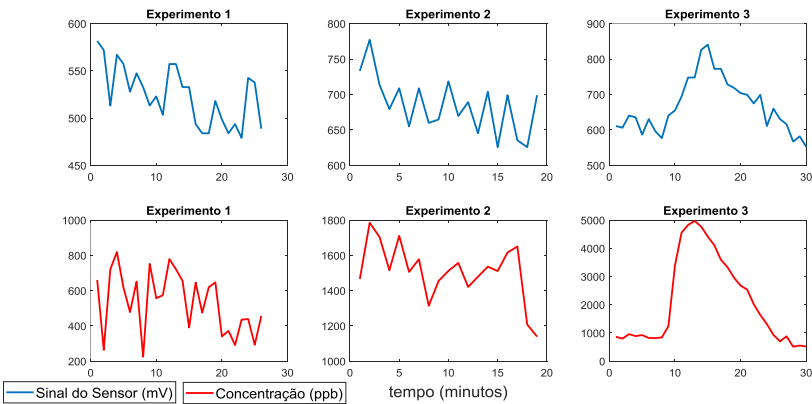
```

APÊNDICE D – Séries temporais dos experimentos de calibração e validação

a) Resultados dos experimentos de calibração



b) Resultado dos experimentos de validação



## APÊNDICE E – Instruções de uso e operação do SMCO

**Nome do equipamento:** *Sistema de medição de monóxido de carbono de baixo custo (SMCO-LCQAr)*

**Importante!**

Por favor, não utilize o equipamento sem ler este documento inteiramente! Siga incondicionalmente as instruções e recomendações de operação e uso.

**Cuidados**

- Não desligue a fonte de alimentação da rede durante o modo de aquisição de dados. Isso pode danificar o cartão SD.
- Não remova nenhum fio ou outro componente eletrônico de seu respectivo local.
- Não permita que o interior do SMCO entre em contato com líquidos.
- Transporte o equipamento na posição na qual a tampa fique para cima.
- Não permitir a entrada de líquidos pelas mangueiras de entrada e saída.
- Verifique se as mangueiras estão desobstruídas antes de iniciar o funcionamento.
- Não encoste os dedos nos trocadores de calor. Há risco de queimaduras.
- Se houver contato entre os fios e trocadores de calor, utilize fita isolante antitérmica.
- Não obstrua as entradas de ventilação do equipamento. Elas são importantes para remoção do calor gerado pelos trocadores. Há perigo de incêndio quando em uso prolongado.

### **Instruções de operação e uso**

1. Conectar a fonte de alimentação (input 100-220V/AC output 12V–2A/DC) à rede elétrica

2. Conectar a o plugue da fonte de alimentação ao plugue de energia do SMCO
3. Remover as tampas das mangueiras
4. Posicionar chave ON/OFF na posição ON
5. Posicionar chave SETUP/ACQUISITION na posição SETUP
6. Pressionar o botão INICIAR ( $\pm 2s$ ) até início da operação de SETUP ( $\pm 120s$ )
7. Aguardar por  $\pm 1h$  para descontaminação do sensor e câmara de medição
8. Posicionar chave SETUP/ACQUISITION na posição ACQUISITION
9. Pressionar o botão INICIAR ( $\pm 2s$ ) até início da operação de ACQUISITION
10. Aguardar durante o tempo de aquisição desejado
11. Posicionar a chave SETUP/ACQUISITION na posição SETUP
12. Posicionar chave ON/OFF na posição OFF
13. Desconectar o plugue de energia do SMCO do plugue da fonte de alimentação
14. Desconectar a fonte de alimentação da rede elétrica
15. Recolocar as tampas nas mangueiras de entrada e saída